SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FÖLDTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS

**MAGYARORSZÁGI ERDEIFENYŐ ÁLLOMÁNYOK KOMPLEX
DENDROKLIMATOLÓGIAI ELEMZÉSE AZ ELMÚLT 100 ÉV
KLÍMAVÁLTOZÁSÁNAK TÜKRÉBEN**

MISI DÁVID

Témavezető:

Náfrádi Katalin Ph.D.

egyetemi adjunktus

FÖLDTANI ÉS ŐSLÉNYTANI TANSZÉK
SZEGED

2017

„Although computerization and other technological developments have speeded up the process dramatically, they have not necessarily made it any better. «Dendro-by-the-numbers» has always been a mistake, and would-be dendrochronologists who think that they merely have to plug numbers into a black box and sit back and wait for a correct date will inevitably be disappointed. Reality, as we so often forget, is the wood itself.”

*Peter Ian Kuniholm
Dendrochronologia 20/1-2:63-68 (2002)*

TARTALOMJEGYZÉK

AZ ÉRTEKEZÉSBEN GYAKRAN ELŐFORDULÓ RÖVIDÍTÉSEK.....	5
1. BEVEZETÉS	6
2. TUDOMÁNYTÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS	9
2.1. Magyarországi dendrokronológiai kutatások	11
3. AZ ÉVGYŰRŰKUTATÁS BIOLÓGIAI ÉS MÓDSZERTANI ALAPJAI	12
3.1. A fatest belső szerkezete.....	12
3.2. Az évgyűrűnövekedést befolyásoló tényezők	15
3.2.1. Természetestől eltérő évgyűrűkarakterek	16
3.3. Dendrokronológia	18
3.3.1. Mintavétel és mintafeldolgozás	19
3.3.2. Keresztdataálás	23
3.3.3. Mesterkronológia.....	26
3.3.4. A módszer problematikája.....	26
3.4. Dendroklimatológia	28
4. ANYAG ÉS MÓDSZER	30
4.1. Mintaterületek.....	30
4.1.1. Bakonyalja	30
4.1.2. Őrség.....	32
4.1.3. Mecsek.....	34
4.1.4. Nyírség	35
4.1.5. Egyéb adatforrás: Erdőleltár	36
4.2. Mintavétel és kronológiaépítés	36
4.3. Az elmúlt 100 év klimatikus elemzése	40
4.3.1. Az elemzés eredményei	41
4.4. Az évgyűrűkben lévő éghajlati jel vizsgálata	46
4.5. Természetestől eltérő évgyűrűkarakterek	47
5. EREDMÉNYEK	49
5.1. Területi évgyűrűkronológiák	49
5.2. Klíma-növekedés kapcsolat.....	52
5.3. A klíma-növekedés kapcsolat időbeli stabilitása.....	57
5.3.1. Bakonyalja	57
5.3.2. Őrség.....	62
5.3.3. Mecsek.....	66

5.3.4. Nyírség	70
5.4. Speciális évgyűrűkarakterek	73
6. KÖVETKEZTETÉSEK.....	78
6.1. A magyarországi erdeifenyő évgyűrűk szélességi növekedésének klimatikus feltételei	78
6.2. A magyarországi erdeifenyők klíma-növekedés rendszerének időbeli stabilitása az elmúlt 100 év éghajlati viszonyainak tükrében	80
6.3. Az eredmények térbeli kiterjeszthetőségének vizsgálata	90
7. ÖSSZEFOGLALÁS	96
8. SUMMARY	98
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	100
10. IRODALOMJEGYZÉK	101
11. ÁBRAJEGYZÉK.....	111
12. TÁBLÁZATJEGYZÉK	114
13. MELLÉKLETEK JEGYZÉKE	115
MELLÉKLETEK.....	116

AZ ÉRTEKEZÉSBEN GYAKRAN ELŐFORDULÓ RÖVIDÍTÉSEK

a megjelenésük sorrendjében

IADF	Éven belüli sejtsűrűség ingadozás
NR	Vékony évgyűrű
Rbar	A minták közti keresztkorreláció
EPS	A mintákban lévő közös populációs jel
NÉBIH	Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal
AI	Ariditási index
EW	Korai pászta
LW	Kései pászta
RW	Teljes évgyűrű
DJF	Tél (December-Január-Február)
JJA	Nyár (Június-Július-Augusztus)
MAM	Tavaszi (Március-Április-Május)
SON	Ősz (Szeptember-Október-November)

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt 100 év klímaváltozásának rövid- és hosszútávú hatásait számos szemszögből és számtalan szempont alapján lehet és érdemes vizsgálni, tekintettel a lezajlott folyamatok időbeli és térbeli kiterjedésére, a rendszerre, amire a változások hatással voltak, a gazdaságra, melynek a módosult körülményekhez való adaptációt, vagy épp az ellenük való védekezést finanszíroznia kell, az esetleges átalakulások (legyen az bármilyen jellegű) mértékére, és ami talán a legfontosabb, a természeti és társadalmi válaszreakciókra. Ezen rendkívül összetett és bonyolult rendszert a természet- és társadalomtudományok, a közgazdaságtan és természetesen a jogalkotás oldaláról is folyamatosan elemzik, predikciókat készítve a jövőre. Annak érdekében, hogy az elkészített forgatókönyvek a lehető legpontosabb képet mutassák az elkövetkező folyamatokról, valamint azok hatásairól, a modelleket, amik a becsléseket végzik, számos bemeneti adattal kell feltölteni. A múltban történt környezetváltozások és azok társadalmi-gazdasági vetületei jelentik ezeket a kiinduló adatokat, forrásaik pedig attól függően, hogy milyen időbeli lefedettség elérése a cél, származhatnak (a teljesség igénye nélkül) geológiai, paleoklimatológiai, paleoökológiai, régészeti, történelmi, vagy recens ökológiai, biológiai és környezeti kutatásokból.

Ha éghajlatváltozásról esik szó, a lehető legnagyobb időbeli felbontás elérése a cél, ugyanis számos olyan rövid idő alatt bekövetkező folyamatot befolyásolnak a klimatikus események, melyek vizsgálatára a több száz éves felbontású adatforrások nem tudnak megfelelő minőségű és mennyiségű információval szolgálni. Ilyenek lehetnek például a szélsőséges időjáráshoz kapcsolódó mezőgazdasági „katasztrófák”, amiket az aszály, vagy adott esetben a megszorodott rovarok és rágcsálók okozhatnak, ezzel súlyos élelmiszerellátási zavarokat indukálva, melyeknek jelentős gazdasági és társadalmi következménye lehet már rövidtávon is. De ide sorolhatók az egyre gyakrabban jelentkező hőhullámok (Della-Marta et al. 2007) egészségünkre, és természetesen az éghajlat- és környezetváltozások állat- és növényvilágra gyakorolt hatásai is. A több száz, vagy akár több ezer éve történt eseményeket évtizedes, vagy éves skálán vizsgálni azonban nem könnyű. Mindössze néhány adatforrás alkalmas arra, hogy ilyen távlatokban megfelelő minőségű és mennyiségű információt tároljon. Ezek közül talán a legismertebbek a fák évgűrűi, melyek,

köszönhetően éves növekedési ciklusuknak, nagy mennyiségű adatot raktároznak a fát érő külső hatásokról fejlődésük minden esztendejéből.

Jelen értekezésben az évgyűrűkutatás zászlóshajójának számító dendroklimatológia segítségével keresem a választ arra, hogy vajon a közelmúltban lezajlott (és természetesen napjainkban is tartó) klímaváltozás milyen hatással volt az erdős ökoszisztémára, és ezen belül a hazai erdeifenyő állomány klíma-növekedés kapcsolatára? Ennek érdekében megvizsgáltam, hogy mely éghajlati paraméterek befolyásolják leginkább a magyarországi erdeifenyő (*Pinus sylvestris*) állományok évgyűrűnövekedését, és hogy ezen paraméterek hogyan változtak meg az elmúlt 100 év során, valamint, hogy ez a változás milyen hatással volt a fenyők klíma-növekedés rendszerére. E mellett fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy az olyan speciális évgyűrűkarakterek, melyek a szakirodalom szerint szélsőséges külső körülményekhez köthetők, megjelennek-e a hazai erdeifenyőkben, és ha igen, gyakoriságuk hogyan változott az elmúlt 100 évben? A téma meglehetősen időszerű, ugyanis külföldi kutatások eredményeiből tudjuk, hogy a jelenleg is zajló felmelegedés az elmúlt évtizedekben jelentős hatással volt az erdős ökoszisztémára. Több faj esetében is megfigyelték, hogy a növekedési időszak kezdete korábbra tolódott (Koprowski 2013; de Luis et al. 2014), valamint azt is, hogy az időtartama (Menzel-Fabian 1999) és az évgyűrűnövekedés dinamikája is több esetben módosult (D'Arrigo et al. 2008; de Luis et al. 2014). Amellett, hogy egyes esetekben az év bizonyos szakaszaiban történő hőmérséklet emelkedés pozitív befolyással bír a fák növekedésére (Churakova et al. 2014), számos negatív hatást is kifejt, melyek hosszú távon többnyire a növekedési ráta csökkenésével járnak (Reich-Oleksyn 2008; Koprowski 2013; Bauwe et al 2015; Misi-Náfrádi 2016b, Misi-Náfrádi 2017).

A problémakör a hazai tudomány előtt sem ismeretlen. A Bakonyban (Führer et al. 2011; Misi-Náfrádi 2016b), a Bükk-hegységben (Garamszegi-Kern 2014) és a Soproni-hegységben is (Führer et al. 2016) készültek már olyan tanulmányok, melyek a változó éghajlati viszonyok eddigi és jövőbeli hatását vizsgálták a fák növekedésére. Bár a kutatók többsége megegyezik abban, hogy a jelenleg zajló éghajlati trend hosszú távon a növekedés és a termőképesség visszesését fogja okozni, eredményeiket jellemzően lombhullató fajok vizsgálatára alapozzák. Annak ellenére, hogy Magyarországon az erdővel borított területek 5,8%-át erdeifenyő fedi, ezzel megelőzve a gyertyánt és a bükköt is [1], ezen faj meglehetősen alulreprezentált az erdészeti- és évgyűrűkutatásban. Bár hazánkban nem őshonos [2], régóta résztvevője, sőt, rendkívül fontos eleme az erdős ökoszisztémának, köszönhetően magas adaptációs képességének, mely alkalmassá teszi az olyan területekre való telepítésre is (például

a futóhomok megkötése céljából a Duna-Tisza közén), ahol nagyobb tápanyagigényű fajok nem tudnának életben maradni (1. ábra).

1. ábra. Magyarországi erdeifenyő állományok a NÉBIH Erdőleltárának adatai alapján. (Forrás: NÉBIH Erdészeti Igazgatóság, Erdőleltár, <http://portal.nebih.gov.hu/web/erdoleltar>)

Az alkalmazkodás azonban nem feltétlenül jelent zavartalan növekedést. A magyarországi erdeifenyők éghajlati válaszreakcióinak változását azért is fontos vizsgálni, mert ahogy arra nemzetközi kutatások is rámutatnak, a jövőben az erdeifenyők növekedési tendenciái jelentősen módosulhatnak Európa ezen részén (Reich-Oleksyn 2008; Bauwe et al. 2015), sőt, már a jelenlegi körülmények is mérhető negatív hatással vannak egyes hazai erdeifenyő állományokra (Gulyás et al. 2014).

Disszertációmban négy eltérő földrajzi elhelyezkedésű és különböző növekedési környezetű mintaterület erdeifenyő állományát vizsgáltam meg, hogy a fentebb említett kérdések megválaszolására kísérletet tegyek, hogy munkámmal hozzájáruljak a magyarországi évgyűrűkutatás eredményeihez, és hogy bővítsem az erdeifenyők növekedéséről jelenleg meglévő ismereteket.

2. TUDOMÁNYTÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A rendkívül pontos kormeghatározás a régészetben, a hosszú időskálájú, megbízható klímainformációk pedig a paleoklimatikus vizsgálatokban tették kiemelt jelentőségűvé az évgyűrűkutatást. A tudományterület megszületését Andrew E. Douglass-hez kötik, aki karrierjét Bostonban a *Harvard College Observatory*-ban kezdte, majd 1894-től az Arizona államban található *Lowell Astronomical Observatory* munkatársa lett. A csillagászként dolgozó tudós fő kutatási területe a napfolttevékenység, valamint annak a földi klímára gyakorolt hatása volt. Douglass munkáját nehezítette, hogy az 1900-as évek első felében az éghajlati adatsorok nagyon ritkák, és a legtöbb esetben túlságosan hiányosak voltak ahhoz, hogy egyértelmű kapcsolatot tudjon megállapítani a napfolttevékenység ciklikus változása és az időjárás ingadozása között. Egy útja alkalmával, mely Észak-Arizona erdőségeit keresztezte, megfigyelte, hogy a kivágott fenyők évgyűrűinek szélessége más mintát követ, mint amit korábban *New England*-ben megszokott, valamint észrevette, hogy az Arizonában található erdők lényegesen ritkábbak, mint *new englandi* társaik, ahol a fák növekedését elsősorban az erdő sűrűsége miatti fényért való harc befolyásolta. Douglass úgy gondolta, hogy ha az arizonai erdők fáinak növekedésében nem az állománysűrűségből adódó hatások játsszák a főszerepet, hanem elsődleges stressz faktorként a rendelkezésre álló csapadék mennyisége befolyásolja az éves keresztmetszet növekedését, akkor talán a kedvezőtlen körülményekkel leírható száraz éveket reprezentáló vékony évgyűrűk vizsgálatával lehetősége lesz egy olyan proxyt elkészíteni, melyet eredményesen felhasználhat kutatásaihoz (Fritts 1976). Az évgyűrűgörbéken elvégzett vizsgálatok során rájött, hogy az azonos időben nőtt egyedek évgyűrűmintázataiban nagyfokú hasonlóság van, sőt, egyezéseket talált egymástól közel 100 mérföldre lévő erdők fáinak évgyűrűgörbéiben is. Az azonos minták összehasonlítása volt az első lépés a keresztmetszet használatára az évgyűrűkutatásban, azonban első gyakorlati alkalmazása csak 1904-ben történt meg (Robinson 1976). Ekkor Douglass egy kidőlt fatörzs évgyűrűinek vizsgálatával és a keresztmetszet segítségével megállapította a fa kivágásának pontos dátumát. A keresztmetszet, vagy más néven átlapolás, az évgyűrűkutatás legfontosabb elve lett, mely kimondja, hogy ha két, vagy több fa életének valamely periódusa egybeesik, akkor évgyűrűgörbéik lefutása is nagymértékű hasonlóságot fog mutatni (bővebben lásd a 3.3.2. fejezetet) (4. ábra). Ezzel a technikával 1914-re felállított egy 500 éves amerikai sárgafenyő (*Pinus ponderosa*) kronológiát.

Douglass két megállapítást tett a felfedezését illetően (Dean 1978): (a) a keresztmetszet fontos eszköze lehet a kormeghatározási módszereknek, azáltal, hogy a minta, melyben az

évgyűrűk vastagsága változik, kijelöli a pontos naptári éveket. Ehhez vagy a legkülső évgyűrű keletkezési évét kell tudni, vagy sikeresen be kell illeszteni az évgyűrűgörbét egy már korábban létrehozott kronológiába. Megjegyzi továbbá (b), hogy maga az évgyűrűminta az adott év környezeti körülményeinek lenyomata, így azok nagy pontossággal tanulmányozhatók általa. Bár kutatásainak fókuszpontjában továbbra is a klíma és a napfolttevékenység álltak, a *North American Museum of Natural History* egyik antropológusa felkérésének eleget téve figyelme rövid időre a régészet felé fordult. Egy hatalmas *azteci* (Új-Mexikó, USA) romban talált hat törzs keresztadatálását végezte el, mely során felállított egy 139 év hosszúságú kronológiát, azonban mivel nem tudta beilleszteni az arizonai görbéibe, nem tudott abszolút kort rendelni hozzá, így egy lebegőkronológia jött létre. Néhány évvel később újabb faanyagot kapott, ezúttal a *Pueblo Bonito*ból, a *Chaco Canyon*ból. A kilenc korong segítségével sikerült elkészítenie egy 100 éves kronológiát, melyet keresztadatálni tudott az aztecivel. Ebből kiderült, hogy a *Pueblo Bonito* építése 40 évvel korábban zajlott, mint az azteci romoké. Bár még mindig egy relatív lebegő kronológiáról volt szó, mégis kiemelkedő eredménynek számított, mivel ez volt az első precízen meghatározott időbeli kapcsolat a prehisztorikus pueblok között. Az eredmény hatására a régészet az évgyűrűkutatás felé fordult. Expedíciók szerveződtek, és hosszú évek, valamint több száz gerenda vizsgálata után a környező pueblokból, 1928-ban sikerült létrehozni az 585 éves, immáron abszolút kronológiát (Robinson 1976). Douglass neve ekkorra már összefonódott a dendrokronológiával, mely egyre nagyobb potenciállal bírt a régészetben. Kiemelkedő szerepe volt az 1937 decemberében a *University of Arizona* kötelékében létrehozott *Laboratory of Tree-Ring Research* megalapításában, mely a világ első, kimondottan az évgyűrűkutatásnak szentelt laboratóriuma lett. A következő két évtizedben a délkelet-amerikai kronológiák tökéletesítésén és kiterjesztésén fáradozott, azonban 1953-tól a laboratóriumban kevesebb figyelmet kaptak az ilyen irányú kutatások, így visszatért eredeti nyomvonalához, a klímához és a napfoltokhoz, melyet haláláig nem is hagyott el. A *Laboratory of Tree-Ring Research*ben kiváló kutatók léptek nyomdokaiba, mely a mai napig a dendrokronológia egyik legmeghatározóbb tudományos műhelye. Az évszázad második felére az új tudományterület elért Európába is, ahol elsőként Bruno Hubert német kutató alkalmazta, majd őt követték lengyel, norvég, svéd, finn és dán kollégák is, mindaddig, míg mára a Föld minden pontján alkalmazott diszciplína lett.

2.1. Magyarországi dendrokronológiai kutatások

A magyarországi évgűrűvizsgálatok már egészen korán, az 1940-es években elkezdődtek (Kulin 1941), ám szisztematikus, hosszú távú kutatásról ekkor még nem beszélhettünk. A múlt század második felében azonban megszáporodtak az évgűrűkutatáshoz köthető tudományos munkák. A korai szakaszból kiemelendő Majer Antal (Majer 1972) munkája, mely elsősorban erdészeti nézőpontból elemzi a fák évgűrűit, valamint Szabó Zoltán 22 oldalas „A dendrokronológiáról” című összefoglalása (Szabó 1975), melyben kitér a módszerre, a fa felépítésére, az évgűrű növekedést meghatározó tényezőkre, a dendroklimatológiára, a mintavételre és a minták feldolgozására is. Nem sokkal később Horváth Emil hidrológus használta fel az évgűrűkutatást a Vértesben végzett vizsgálataihoz. Módszerei lényegét 1981-ben publikálta a Magyar Hidrológiai Társaság Vándorgyűlésén Pécsen (Horváth 1981), majd 2004-ben egy cikk keretében foglalta össze 25 éves kutatásának eredményeit, melyek 24 darab, főként a Vértes területéről, valamint 17 darab Debrecenből származó mintán alapultak (Horváth 2004). Horváth Emil a Bakony-Vértes-Székesfehérvár háromszögre 1559–1993-ig terjedő idősort állított össze. Az 1980-as években Babos Károly és Papp Zoltán is foglalkozott az évgűrűk szélessége és a csapadék, valamint a hőmérséklet változása közti összefüggéssel, és ezek napfolttevékenységgel való összevetésével (Babos 1983, 1986; Papp 1986). Papp ezen kívül egy hazánkban rendkívül különlegesnek számító területtel, a vulkánkitörések évgűrűszélességet befolyásoló hatásával is foglalkozott, mely kutatás eredményeit nem csak hazai (Papp 1984), de nemzetközi szinten is publikálta (Papp 1983). A következő években lényegesen visszaesett az évgűrűszélességek és az éghajlati elemek kapcsolatának vizsgálata Magyarországon. Az új évezredben Csókáné Szabados Ildikó (Szabados 2006, 2007), valamint Kern Zoltán (Garamszegi-Kern 2014; Kern et al. 2016; Kern-Popa 2007, 2008) munkássága adott új lendületet a hazai évgűrűkutatásnak. Utóbbi kiemelt érdeme, hogy már nem kizárólag az évgűrűkben található klíma-növekedés kapcsolat elemzésével foglalkozott, hanem hosszú időátfogású klímarekonstrukciókat is készített (Kern et al. 2004, 2009a, 2009b, 2013), ezzel meghonosítva a dendroklimatológia egyik legdinamikusabban fejlődő ágát hazánkban. Az éghajlati változékonysághoz szorosan kapcsolódó munkáikban Ladányi Zsuzsanna és Blanka Viktória a termőhelyükön a fák növekedésére ható tényezők súlyát (Ladányi-Blanka 2015), Nagy László pedig az erdeifenyők alkalmazkodóképességét és válaszreakcióit vizsgálták (Nagy 2009). Blanka és munkatársai foglalkoztak továbbá az évgűrűkutatás egy itthon szintén kevésbé ismert területével, a

dendrogeomorfológiával is, melynek segítségével a Maros kanyarulatképződésének tér- és időbeli változását vizsgálták (Blanka et al. 2006).

A dendrokronológia régészeti alkalmazása számos magyarországi eredménnyel rendelkezik (Ilon et al. 2001; Kertész et al. 2005; Grynaeus 2006; Grynaeus-Sarkadi 2007; Kern et al. 2014). A terület rendkívül fontos eredménye, hogy hosszas kutatómunka során Grynaeus András megalkotta a közép-magyarországi tölgy alapkronológiát, mely 13 mintaterület mintegy 90 recens mintájának vizsgálatából készült el (Grynaeus 2004). Emellett több kisebb kronológiát is felépített, valamint sikeresen felállított egy pannóniai tölgykronológiát és egy nyugat-magyarországi tölgykronológiát is. A dendrokronológia régészeti alkalmazását tárgyalva fontos megemlíteni Morgós Andrást is, aki több hazai és külföldi, elsősorban állagmegőrzéssel (Morgós 2001, 2002a; Morgós et al. 2006) kapcsolatos projekt résztvevője volt. 2001-ben Hovánszky Györggyel megalkották a DenScan nevű számítógépes programot, mely képes a mérési adatok rögzítésére, az évgűrűsorok szinkronizálására, az adatok grafikus megjelenítésére, valamint .rwl és .raw kiterjesztésű fájlok konvertálására.

3. AZ ÉVGYŰRŰKUTATÁS BIOLÓGIAI ÉS MÓDSZERTANI ALAPJAI

3.1. A fatest belső szerkezete

A fatest belső szerkezete mind mikroszkópos, mind makroszkópos jellemzők alapján jól elkülöníthető részegységekből áll. Az értekezés témájához igazodva jelen fejezetben kizárólag a makroszkópos szerkezet kerül bemutatásra, mert bár minden mérés mikroszkóp használatával történt, összességében elsősorban a makroszkóposan is azonosítható jegyek vizsgálatát végeztem el.

A legtöbb fa belső szerkezete három nagyobb részegységre bontható, melyeken belül további elemek különíthetők el. Kívülről befelé haladva az első nagy egység a kéreg, mely két részre osztható, háncsra (belső kéreg) és héjkéregre (külső kéreg). Szerepük bár különbözik, mindkét részegység állapota meghatározó jelentőségű a fa egészének élettani tulajdonságait tekintve. A külső kéreg feladata a fatest védelme a mechanikai sérülésekkel szemben, a belső kéreg pedig a tápanyagok szállításában és raktározásában játszik pótolhatatlan szerepet.

A kéreg alatt található a szíjács, mely a legfiatalabb évgűrűket tartalmazza, és melynek legfontosabb feladata a fa számára elengedhetetlen víz szállítása. A szíjács jellemzően puhább, mint a fatest többi része, melynek oka a kisebb gyanta- és cserzőanyag tartalom (Molnár et al. 2007). Ennek köszönhetően a biotikus és az abiotikus károsítókkal szemben kisebb ellenállással

jellemezhető. Kedvezőtlen mechanikai tulajdonságai miatt a szíjácst gyakran eltávolítják a fák felhasználása előtt, melynek fontos jelentősége van a dendrokronológiai datálás során. Az ezzel kapcsolatos problémakört a 3.3.4. fejezet részletezi.

A következő nagy szerkezeti egység a geszt, mely tulajdonképpen a fatest korábban szíjácsként funkcionáló holt része, mely a vízszállításban már nem vesz részt, csak szilárdító szerepe van. A szíjács gesztté alakulása folyamatosan, évről évre történik, mely során számos élettani, biológiai és kémiai változás történik a fatest adott szakaszán. Gyakori, hogy a folyamat során gesztesedő anyagok rakódnak le a sejtfalakon és a sejtüregekben, mely a geszt elszíneződését eredményezi. Ennek megfelelően színes gesztű (pl. erdeifenyő) és színes geszt nélküli (pl. bükk) fák különíthetők el (Molnár et al. 2007). A gesztesedés a bél irányából indul, és átlagosan évente egy évgyűrű alakul át szíjácsból gesztté. A szíjács-geszt határvonal mindig követi az évgyűrűk ívét, azonban az átmenet jellege különböző lehet: egyes fajoknál éles, jól elkülöníthető határvonal alakul ki (pl. tölgyek), míg másoknál az átmenet folyamatos (pl. fűz) (Molnár et al. 2007). A geszt-szíjács arány szintén fontos mutatószám a dendrokronológiában, jelentőségével a következő fejezetekben foglalkozom.

2. ábra. Egy túlelevelű keresztmetszeti képe. (Fritts 1976 nyomán, módosítva)

A fatest legbelső részén a bél és a juvenilis fa található. Előbbi nem más, mint a legbelső évgyűrű által körbevett, az elsődleges szárból visszamaradt alapszövet. Fiatal korban szállító,

majd később raktározó szerepe van. Mérete és formája fajonként eltérő. A juvenilis fa a bél körül kialakult belső (fajtól függően) 5-20 évgyűrűt tartalmazza. A juvenilis fa évgyűrűi az első években szélesebbek és elmosódott pásztahatárokkal rendelkeznek (Molnár et al. 2007). Határának megállapítására a libriform rostok, a tracheidák hosszúságának mérése alkalmazható. Gencsi (1976) anatómiai vizsgálatai alapján ez a határ erdeifenyőknél 10-15 éves korban jelentkezik.

A fatest kéreg alatti részét teljesen kitöltő, annak minden részegységében megjelenő nagy szerkezeti elem az évgyűrűszerkezet. Évgyűrűk elsősorban a mérsékelt, és egyes esetekben a hideg égvői fákra jellemzőek, ugyanis kialakulásuk a vaszkuláris kambium szakaszos működésének eredménye¹ (Molnár et al. 2007). A téli időszakban nem működik a kambium, a fa törzsének osztódó szövete, így a növekedés csak a tenyészidőszak korai, mikor az újra kialakuló lombkorona (fenyők esetében az újabb hajtások) nagymértékű vízigénye miatt ritkább, nagyméretű szállítóedények keletkeznek, valamint a kései időszakra korlátozódik, amikor a sűrű, kisebb üregű és vastagabb falú szilárdító elemek jönnek létre (Gencsi 1980). Az így kialakult egységeket pásztáknak nevezzük, és attól függően, hogy a tenyészidőszak mely szakaszában képződtek, korai (tavaszi) vagy kései (nyári) előtaggal azonosíthatjuk². A kései és a korai pászta közötti határvonal az évgyűrűhatár, melynek élessége az egyik évgyűrű kései sejtjeinek és az azt követő évgyűrű korai sejtjeinek méretkülönbségétől függ. A pászták egymáshoz való viszonyát Bodig-Jayne (1982) öt csoportba sorolta:

1. a két pászta között folyamatos az átmenet (pl. lucfenyő)
2. a két pászta élesen elválik (pl. erdeifenyő)
3. a pórusok gyűrűs elrendezésűek, a két pászta élesen elválik (pl. tölgy)
4. az évgyűrű nem választható pásztákra, a pórusok szórtak (pl. bükk)
5. a pórusok félig gyűrűs elrendezésűek, a két pászta között fokozatos az átmenet (pl. madárcseresznye).

A korai és kései pászta részaránya az évgyűrűn belül fajonként eltérő, és a fatest mechanikai tulajdonságait alapvetően befolyásolja. Erdeifenyők esetében a kései pászta az évgyűrű 20-40%-át teszi ki, míg vörösfenyők esetében ez a szám 30-45% között mozog. Gyűrűslikacsú

¹ Trópusi fafajoknál is kialakul egyfajta differenciáció a fatesten belül, mely hasonló az évgyűrűszerkezethez, azonban azok a növekedési zónák nem évekhez, hanem a száraz és a nedves időszakok váltakozásához kapcsolódnak.

² A magyar szakirodalom sok esetben tavaszi és nyári pásztaként hivatkozik az évgyűrűk egyes egységeire, ám mivel a növekedési időszak nem jellemezhető egyértelműen ezen két évszakkal, helyesebbnek tűnik az angolszász nomenklatúrából származó korai (*earlywood*) és kései (*latewood*) pászta elnevezés.

lombos fáknál a kései pászta aránya jellemzően lényegesen magasabb (pl. akác 85%, tölgy 65%), melynek köszönhetően jóval szilárdabbak is. További különbség a fenyők és a lombos fák között, hogy míg előbbi csoportnak kései, utóbbinak korai pásztamérete közel állandó. Ebből adódóan a keletkező évgyűrű szélességét fenyők esetében elsősorban a korai, míg lombos fák esetében a kései pászta mérete határozza meg (Molnár et al. 2007).

3.2. Az évgyűrűnövekedést befolyásoló tényezők

A gyűrűk növekedési tulajdonságai rendkívül változékonyak, szélességüket több tényező egymásra gyakorolt hatása alakítja ki. Tárgyalásuk során rendszerint két nagy csoportba sorolhatók: *belső* és *külső* tényezők. Előbbibe tartoznak a fák azon genetikai sajátosságai, melyek fajtól függően befolyásolják növekedési ütemüket. Ezek közül legfontosabb a fiatal korban tapasztalható intenzívebb fejlődési ritmus, mely a legtöbb fajra jellemző, és nagy körültekintést igényel az adatok feldolgozása során. Az ekkor létrejövő juvenilis fára még jelentéktelen mértékben hatnak a külső tényezők, az évgyűrűk növekedési dinamikáját elsősorban a túlélésért folytatott harc határozza meg. Ennek köszönhetően a dendroklimatológiai vizsgálatok során általában a juvenilis fában található évgyűrűket eltávolítják az adatsorból. A külső tényezők spektruma rendkívül széles, ugyanis számos kívülről érkező impulzus befolyásolja a növekedési trendet. Általános csoportosításuk alapján lehetnek éghajlati (fény, hőmérséklet, csapadék), időjárási (tavaszi fagy, szárazság, szél), termőhelyi (tápanyagtartalom, kitettség, kártevők, légnedvesség), valamint Földön kívüli (napfolttevékenység) jellegűek, de ide tartoznak a természeti katasztrófák (vulkánkitörés, erdőtűz, lavina) hatására bekövetkező változások is (Morgós 2002b).

Bár a fényviszonyok, a talajvíz szintje, a lejtő morfológiája vagy az egyes tömegmozgások számottevően befolyásolják a teljes évgyűrűmintázatot, a disszertáció témájához igazodva jelen fejezetben a külső körülmények közül a csapadék és a hőmérséklet évgyűrűszélesség módosító hatását tárgyalom részletesebben. Annál is inkább szükséges ezen klimatikus tényezők alaposabb kifejtése, mert a termőterület helyzetétől függően különböző mértékben és eltérő módon hatnak. Legyen szó akár a hőmérsékletről, akár a csapadékról, közvetlen és közvetett módosító szerepről beszélhetünk.

A csapadék esetében a közvetlen hatás a gyakoribb, mely jellemzően arid és szemi-arid területeken alakul ki, és elsődleges oka, hogy a csapadék határozza meg a talajnedvességet, mely alapvető fontosságú a fák növekedésében. Ezt a kapcsolatot tovább erősítheti a rossz vízgazdálkodású talaj, az alacsony tengerszint feletti magasság és a déli fekvés is (Strumia

1999). A csapadék évgyűrűszerűségét befolyásoló direkt hatása pozitív korrelációval jelenik meg a dendroklimatológiai vizsgálatok során, és az éghajlati elem limitáló jellegét tükrözi. A közvetett hatás lényegesen ritkább, és elsősorban olyan területekre jellemző, ahol a talaj vízelvezető képessége alacsony, így a nagymértékű csapadék anaerob körülményeket teremt, melyek csökkentik, vagy akár le is állíthatják a gyökérnövekedést. Az ilyen indirekt kapcsolat negatív korrelációval jelentkezik a vizsgálatok során.

A hőmérséklet közvetlen és közvetett hatása egyaránt gyakori. Előbbi olyan termőterületeken fordul elő, melyek közel találhatók az adott faj magassági vagy földrajzi szélességi elterjedési határához, de megfigyelhető északi lejtőkön és szokatlanul hűvös mikroklimán is (Fritts 1976). A közvetlen kapcsolat oka, hogy az alacsony hőmérséklet lelassítja, vagy akár teljesen meg is állítja a növekedéshez szükséges biológiai folyamatokat. Ebből adódóan a direkt kapcsolat a hőmérséklet és az évgyűrűnövekedés között pozitív korrelációval jelentkezik az elemzések során. Speciális esete a közvetlen hatásnak, amikor a vegetációs időszakon kívül, a téli hónapokban tapasztalható pozitív korreláció az évgyűrűnövekedés és a hőmérséklet között. Ennek oka, hogy a magas téli hőmérséklet csökkenti a hóborítást, ezzel segítve a nedvesség hatékonyabb beszivárgását a talajba, mely a vegetációs időszak kezdetekor intenzívebb fotoszintézist eredményez (Fritts 1976). A termikus viszonyok közvetett hatása szemi-arid és alacsony fekvésű területeken a legtipusosabb, és negatív korrelációval jelentkezik az eredményekben, elsősorban a nyári időszakban. Ennek oka a magas hőmérséklet és az intenzív párolgás, ezáltal a felhasználható nedvesség kapcsolatában keresendő. Szintén negatív korrelációval jelentkezhet a késő nyári-kora őszi időszakban tapasztalható szokatlanul meleg is, ugyanis ebben az esetben a vegetációs időszak túlságosan kitolódhat, ezzel rövidítve a fák felkészülését a téli időszakra (Fritts 1976).

3.2.1. Természetestől eltérő évgyűrűkarakterek

Azon túl, hogy a csapadék és a hőmérséklet közvetlen és közvetett faktorként befolyásolja az évgyűrűk növekedését, rendkívül fontos szerepük van a szélsőséges körülmények kialakulásában is. Az extrém események jelentős mértékben befolyásolják az adott évben keletkező évgyűrű jellemzőit, ezzel szignifikáns hatást gyakorolva az évgyűrűmintázatra. A szélsőség jellegétől függően kialakulhatnak világos évgyűrűk (Liang-Eckstein 2006), fagyott évgyűrűk (Hantemirov et al. 2004; Kern-Popa 2008; Bräuning et al. 2016), éven belüli sejtsűrűség ingadozások (de Luis et al. 2011; De Micco et al. 2013, 2016; Misi-Náfrádi 2016a), szokatlanul vékony évgyűrűk (Panayotov et al. 2013; Misi-Náfrádi

2016a), de bizonyos esetekben lokálisan, vagy akár a törzs teljes keresztmetszetéből hiányzó évgyűrűk is. Ezen felsorolásból kiemelhető az éven belüli sejtsűrűség ingadozás, melyet korábban álévgyűrűként is aposztrofáltak, valamint a szokatlanul vékony évgyűrűk, ugyanis mindkét évgyűrűkarakter-módosulat jól azonosítható már makroszkóposan is, ezáltal marker jellegük kihangsúlyozódik, mely a keresztmetsztés során fontos szempont lehet, továbbá az esetek többségében mindkettő markáns külső stresszhez köthető. Az éven belüli sejtsűrűség ingadozás (az angol irodalomban *intra-annual density fluctuation*, IADF) legtipusosabban a mediterrán térségben alakul ki. Az esetek többségében két típusa jelenik meg, az úgynevezett L-gyűrű (*L-ring*) és E-gyűrű (*E-ring*). Előbbi során látszólag a korai pásztára jellemző nagyobb méretű sejtek jönnek létre a kései pásztában, míg utóbbi alkalmával éppen fordítva, látszólag a kései pásztára jellemző sejtek alakulnak ki a korai pásztában (3. ábra). A látszólagos jelleg abból adódik, hogy valójában az adott növekedési ciklusra jellemző sejtek fejlődnek, azonban a külső stressz hatására sejt méretük megváltozik. Az L-gyűrűk esetében a mediterrán térségben tapasztalható nyári csapadékminimum rendkívüli stresszt jelent a fák számára, aminek hatására jelentősen lelassul, sőt egyes esetekben le is áll a sejt képződés. Később, a második (őszi) csapadékmaximum alkalmával a lehető leghatékonyabb vízfelvétel biztosítása érdekében a normálisnál nagyobb méretű sejtek képződnek a kései pásztában, melyek első ránézésre a korai pászta edényeire hasonlítanak, azonban mikroszkópos analízis során a sejt faluk vastagsága alapján egyértelműen elkülöníthetők. Mérsékeltébb éghajlatú erdőkben is kialakulhatnak L-gyűrűk, azonban ebben az esetben nem a csapadékmaximum, hanem a nyári magas hőmérséklet eredményezi a sejtek méretének növekedését és a sejt falak szélességének csökkenését (Vaganov et al. 2006). Az E-gyűrűk kialakulásának oka hasonló, a különbség abban rejlik, hogy ebben az esetben a vegetációs időszak korai szakaszában bekövetkezett hóhullám vezet a sejt falak megvastagodásához, ezzel a kései pásztára jellemző sejt szerkezet kialakulásához.

3. ábra. Éven belüli sejtsűrűség ingadozás. A) Normál évgyűrű, B) L-gyűrű, C) E-gyűrű. (Saját felvétel)

Szokatlanul vékony évgyűrűk (NR) kialakulásához több külső körülmény is vezethet. Leggyakoribb a nyári aszály, mely során szélsőségesen lelassul a sejtnövekedés, okozhatja a téli időszakban bekövetkezett lombkorona károsodás is, mely ha elég kiterjedt, akár több éven át is jelentősen befolyásolhatja az évgyűrűk normál növekedési trendjét (Misi-Náfrádi 2016a), de akár egy komolyabb rovarinváziót követően is számottevően visszaeshet a szélességi növekedés (Koprowski-Duncker 2012). Az évgyűrűk fejlődési zónáit tekintve bármelyiket érintheti a normál sejtméret kialakulásában beállt zavar, így beszélhetünk külön-külön jelentkező szokatlanul vékony korai és kései pásztáról is, de megjelenhetnek együtt is, mellyel értelemszerűen a teljes évgyűrűszélesség jelentősen visszaesik. Az erdeifenyők esetében Magyarországon jellemzően a kései pásztát érinti a visszafogott növekedés, melynek oka, hogy azt ezen a klímán elsősorban az extrém külső klimatikus hatások váltják ki, melyek nyáron, a kései pászta fejlődési időszakában alakulnak ki (Misi-Náfrádi 2016a).

3.3. Dendrokronológia

A dendrokronológia, ahogy azt a neve is mutatja, a fák (görög szó: dendron) és az idő (görög szó: chronos) tudománya, a holocén fontos kormeghatározási eszköze. Amikor Douglass a múlt évszázadban lefektette a diszciplína alapjait, nem csak a keresztadatálással kapcsolatban fogalmazta meg gondolatait, hanem két másik, ma szinkron- és történeti elvekként ismert tételt is lefektetett (Fritts 1976). Bár jelentőségük elmarad a keresztadatálásától, mely az egész tudományterület gerince lett, mégis fontos alapvetéseket tartalmaznak. Előbbi egy párhuzamos tételt fogalmaz meg a keresztadatálással, a kettő között a különbség a folyamat irányában keresendő. Míg a keresztadatálás, vagy más néven átlapolás elve azt mondja ki, hogy ha két vagy több fa életének van közös periódusa, akkor azok évgyűrűgörbéi az átfedő időszakban nagyfokú hasonlóságot fognak mutatni, a szinkronelv alapján megállapíthatjuk, hogy ha két vagy több fa évgyűrűgörbéi között szignifikáns kapcsolat jegyezhető fel, akkor az adott fák nagy valószínűséggel egyidősek, vagy életüknek az adott szakaszát egy időben élték. Utóbbi, a történeti elv, utal a dendrokronológia és az összes évgyűrűszélesség-mérésen alapuló társtudomány alapvetésére, mégpedig az évgyűrűk szélességének folyamatos váltakozására, valamint ezek számottevő klimatikus függésére (Dean 1978). Kimondja, hogy mivel a klíma nem változik periodikusan, így az évgyűrűk sem egy adott rendszer, vagy periodicitás alapján követik egymást, hanem az adott év külső, elsősorban klimatikus körülményeihez igazodva. Bár ezen feltevés értelemszerűnek tűnhet, mégis a kronológiaépítés kulcsa rejlik benne.

3.3.1. Mintavétel és mintafeldolgozás

Kronológiakészítés során alapvető fontosságú, hogy rendelkezésre álljon egy pontos kezdődátummal rendelkező évgyűrűsor, mely a keresztdatalás kezdeti pontját fogja jelenteni. Erre legalkalmasabbak az élő fákból kiemelt minták, melyek utolsó évgyűrűje a mintavétel évét fogja megadni. Kivételt képez ez alól, ha a mintavétel az adott év növekedési időszakának beindulása, tehát az évgyűrűképződés megkezdődése előtt történik. Ilyen esetben az utolsó évgyűrű az előző évet fogja jelölni.

Élő fákból történő mintavétel esetén érdemes körültekintően kiválasztani az adott állományt, valamint az egyedeket annak érdekében, hogy a lehető legjobb minőségű, és a későbbi munkára legalkalmasabb minták kerüljenek levételre. Lehetőség szerint kerülni kell az olyan fákat, melyekre az őket érő külső hatások közül egy vagy több a növekedésük alatt nagy valószínűséggel megváltozott, ezzel módosítva az addigi évgyűrű fejlődési trendet (Stokes-Smiley 1968). Azokban az esetekben, ha a fát a természetestől eltérő fényviszonyok, fejlődése alatt a túlzott sűrűség miatti törzsi torzulások, szélsőséges szélviszonyok, vagy a lejtőn történő növekedés eredményeképp bekövetkezett mechanikai torzulások érik, a mintavétel nem javasolt (Schweingruber 1996). Mintavétel során az élő fákból egy körülbelül ceruza vastagságú furat kerül kiemelésre, erre a célra kialakított kézi növedékfúróval. A speciálisan kidolgozott, üreges fúrószárral rendelkező eszköz a fák bármilyen maradó károsítása nélkül használható. A fúrás mellmagasságban, az évgyűrűkre merőlegesen kell elvégezni (Grissino-Mayer 2003). A furatot kiemelése után egy tartóelemre kell rögzíteni (pl. celluxszal), majd precízen feljegyezni minden olyan adatát, melyre a későbbiekben szükség lehet: azonosítóját, fajtát, a fa pontos helyzetét, tengerszint feletti magasságát, a törzs kerületét, technikai jellegű megjegyzéseket (pl. törött minta, görcshöz közeli fúrás, sérült kéreg, stb.), ha lehetőség van rá, a fa magasságát, valamint érdemes fényképes dokumentációt is készíteni. Abban az esetben, ha a furat kiemelés közben eltörik, minden darabját a lehető legnagyobb körültekintés mellett az eredeti pozíciójában kell a tartóra rögzíteni. Minden ilyen esetet fel kell jegyezni, hogy a laboratóriumi mérések során figyelembe lehessen venni. Ha a törött furatok kezelése nem megfelelő alaposítással történik, az a minta teljes használhatatlanságát okozhatja.

Bár nem az élő, de a recens mintákhoz tartoznak a kidőlt, vagy kivágott fák is, melyek állapotuktól függően rendkívül hasznos információt szolgáltathatnak, ugyanis jellemzően korong levágásával kerülnek mintázásra, melynek nagy előnye a furattal szemben, hogy a törzs teljes keresztmetszetét, az évgyűrűmintázat hiánytalan morfológiáját teszi tanulmányozhatóvá.

A dendrokronológiai vizsgálatok egyik legfontosabb adatforrását jelentik a régészeti ásatásokon előkerülő faanyagok. Mivel a feltárásokon nagy mennyiségű, korábbi funkcióját tekintve meglehetősen változatos faanyag kerülhet elő, azok hozzáértő kezelése elengedhetetlen a későbbi munka megbízhatósága érdekében. Még a mintavétel megkezdése előtt fontos, hogy a minták a terepen megfelelően katalogizálva legyenek. Fel kell jegyezni az objektum függőleges és vízszintes sztratifíciái helyzetét, a földrajzi környezetével és a közelében lévő más objektumokkal való kapcsolatát, valamint az azonosítóját, nevét, és egyéb adatait. Ezek az adatok minden, az adott objektumból kiemelt faanyag esetén azonosak, egyfajta referenciák lesznek, melyeket ki kell egészíteni az egyes leletek speciális adataival, úgy, mint mintaszám, dátum, a minta elhelyezkedése az objektumon belül, valamint a faanyag és a körülötte lévő leletek térbeli kapcsolata (Stokes-Smilely 1968).

A régészeti ásatásokon kiemelt faanyag sok esetben erősen nedves, vagy már vízzel telítődött. Ilyenkor alapvető fontosságú a lelet nedvességének megőrzése, ugyanis a száradás során erős deformáció következik be a kapillárisokban fellépő erőhatások miatt, ami a minta szerkezetének gyengüléséhez vagy teljes széteséséhez vezethet, mely lehetetlenné teszi a későbbi évgyűrűvizsgálatokat. Legjobb megoldás, ha a fatest az óvatos kiemelést követően zárható, vízzel teli edénybe, vagy nylon zsákba kerül a konzerválás megkezdéséig. A vízzel erősen telített faanyagok állagmegőrzési módszereit Morgós (2007) részletesen tárgyalja. A mintavétel csak az után kezdődhet meg, hogy a fatest megfelelő állapotba került.

Száraz faleletek esetén lehetőség van a később vizsgálni kívánt minta helybeni, *in-situ* levételére is korong formában. Fontos azonban, hogy az ilyen minták is megfelelő védelmet kapjanak az esetleges károsodásokkal szemben. Gyakran használt módszer, hogy a mintát a vizsgálatra való előkészítésig fagyasztva tárolják, így szilárdítva azt, valamint megelőzve a különböző biológiai károkat (pl. gombák).

A recens és a régészeti faanyagok között képeznek hidat az épületekben található tartógerendák, melyek mintázása, amellett, hogy a biztonságot mindig szem előtt tartva kell, hogy történjen, az eddigiektől eltérő módszerrel történik. Ilyen esetekben is furat kiemelésére kerül sor, azonban mivel ezek már száraz fák, nem az élő egyedeknél használt növedékfűrőt alkalmazzák (egyes esetekben arra is van lehetőség), hanem egy üreges fűrőszárat, mely egy elektromos kézi fűrőbe csatlakozik. A mintavétel előtt mindig meg kell bizonyosodni a megfelelő biztonsági intézkedésekről, a gerenda állapotáról, meg kell vizsgálni, hogy a mintázni kívánt gerenda tartalmaz-e szíjácsot (ennek jelentőségét a 3.3.4-es fejezet részletezi), milyen orientációban találhatók az évgyűrűk, illetve, ha erre van lehetőség ellenőrizni kell, hogy a faanyag tartalmaz-e elegendő évgyűrűt a későbbi munkához. Mintavétel során egy kb.

13-15 mm-es átmérővel rendelkező fűrészárat használnak, úgy, hogy azzal a lehető legkevésbé feltűnő helyen végezzék el a műveletet (Stokes-Smiley 1968). Fúrás közben fontos odafigyelni a megfelelő fordulatszámra, mely nem lehet túl gyors, és arra, hogy minden néhány centiméteres előrehaladást követően a fűrészport eltávolítsák. Mivel a mintavételt óvatosan kell elvégezni, a munka a gerenda méretétől függően akár fél óráig is eltarthat.

Élő fákból történt mintavétel esetén a minta előkészítés első lépése a furatok végleges rögzítése a tartóelemekre. Ez a folyamat nem kizárólag azért történik a laborban, mert a terepen rendkívül körülményes és időigényes lenne, hanem mert a frissen levett minták nedvességtartalma még magas, azokat hagyni kell légszáraz állapotba kerülni. Amennyiben a végleges rögzítés már helyben megtörténne, úgy a minta nem lenne képes a száradás miatti kismértékű deformációra. Ilyen esetekben a furat eltörhet, vagy oly mértékben károsodhat, mely ellehetetleníti a későbbi munkát.

A légszáraz minták tartóelemre való rögzítése bármilyen típusú gyorsan száradó és magas fokú ragasztási tulajdonsággal jellemezhető ragasztóval történhet, azonban legideálisabbak a kifejezetten fákra kifejlesztett, bútorasztalosok által is használt ragasztók. Csakúgy, mint a terepi ideiglenes rögzítés során, a laborban történő végleges ragasztáskor is maximális körültekintés mellett kell a törött minták darabjait egymás mellé ragasztani. A különbség annyi, hogy míg a terepen nem szükséges szorosan egymás mellé helyezni őket, addig a laborban már a lehető legközelebb, az eredeti, törésmentes állapotot legjobban megközelítő helyzetben kell rögzíteni őket, ezzel minimalizálva a szélességmérés során a törések miatt esetlegesen bekövetkező mérési hibákat. A törött furatok problematikáját tovább szaporítja a tény, miszerint nem mindegy, hogy a furatdarab hogyan kerül felragasztásra. Az magától értetődő, hogy a helyes irányban kell állnia, azonban az sem mindegy, hogyan kapcsolódik a melléte lévő taghoz. Előfordulhat ugyanis, hogy a furatdarab a hossz tengelyével párhuzamosan elfordul, aminek következtében a későbbi csiszolás során az adott szakaszon már nem az évgyűrű keresztmetszete, hanem hosszmetzete fog kirajzolódni. Bár a mintázat első ránézésre hasonló lesz, pontos szélességek így nem mérhetők. Természetesen ez a jelenség ép, törésmentes minta esetében is előfordulhat, ezért általános iránymutatásként a következőt érdemes szem előtt tartani a minta végleges rögzítése előtt: a minta törési felületén (ilyen ép minták esetén is van a minta végén) látható növényi rostok mindig függőlegesen, a mintatartó felületére merőlegesen álljanak (Asherin-Mata 2001). A száradás okozta minimális deformáció miatt (ami általában a minta kismértékű csavarodásával jár) a pontos függőleges iránytól a minta előkészítést végző szakember belátása szerint bizonyos mértékben el lehet térni.

Mivel a dendrokronológiai vizsgálatok alapja az évgyűrűszélességek pontos meghatározása, minta előkészítés során alapvető fontosságú az évgyűrűhatárok lehető legtekélyesebb megjelenítése. Ez általában két módszerrel történik: pengével, vagy más éles vágóeszközzel egyszerűen levágják a furat felső részét, így friss felületet teremtenek, melyen az évgyűrűk már jól kirajzolódnak (ezt természetesen csak furatok esetében alkalmazzák), vagy folyamatosan finomodó csiszolópapír sor segítségével lecsiszolják (Asherin-Mata 2001). Bár utóbbinak gépigénye van, mégis elterjedtebb megoldás, ugyanis lényegesen gyorsabb, még akkor is, ha folyamatosan cserélni kell a csiszolópapírokat, emellett sokkal könnyebb elérni vele a minta teljes hosszában egységes vízszintes felületet, mely a mikroszkópos elemzés során fontos szempont. Ezen irányelv alapján elmondható, hogy kézi csiszolás csak végső esetben ajánlott, mivel úgy egységesen vízszintes felületet meglehetősen nehéz és időigényes létrehozni. A munka során a csiszolópapír sort lehetőség szerint érdemes addig finomítani, amíg egy rendkívül sima, szinte üvegszerűen tükröződő felület nem jön létre.

Az előkészítés után következik az évgyűrűszélességek lemérése. Ez a folyamat több módon is történhet, melyek két nagyobb csoportba sorolhatók: *on-screen* és *off-screen*, vagyis digitálisan, képernyőn, vagy manuálisan, mikroszkópon történő mérés. Mindkét módszer rendelkezik számos előnnyel, azonban általánosabb a mikroszkópos mérés alkalmazása.

On-screen mintafeldolgozás esetén a furatot vagy korongot egy magas képfelbontású (1200 dpi vagy a feletti) szkennel segítségével bedigitalizálják, majd az így kapott képen végzik el a távolságméréseket az alkalmazott szoftver megfelelő kalibrálása után. A munkafolyamat során lehetőség van egyszerű képanalitikai programok (pl. ImageJ), kifejezetten az évgyűrűkutatás számára kifejlesztett alkalmazások (pl. WinDendro), de akár geoinformatikai szoftverek (pl. ArcView) használatára is. A módszer előnye, hogy mikroszkóp nélkül is lehetőséget biztosít évgyűrűszélesség mérésre, azonban hátránya, hogy nagyméretű minták esetén erősen korlátozott a szkennelés lehetősége (ilyenkor lehet próbálkozni fotózással), valamint, hogy a (évgyűrűvizsgálatokhoz fejlesztett programokat nem számítva) mérés utáni adatfeldolgozás rendkívül hosszadalmas lehet.

Az elterjedtebb *off-screen* módszer egy speciálisan kialakított binokuláris mikroszkóppal történik (pl. Rinntech Lintab 6). Az eszköz különlegessége a vízszintesen (jobbra-balra) mozgatható tárgyasztal, melynek minden elmozdulását 0,001 mm pontosan képes a mikroszkóp érzékelni, és azt a hozzá USB porton keresztül csatlakozó számítógépbe juttatni. A mérés menete a következő: minta felhelyezése a tárgyasztalra, az okulárban lévő szátkereszt beállítása a megfelelő helyre, az adatokat rögzítő program konfigurálása a szükséges paraméterekkel, majd a mérés megkezdése (Rinn 2003). Bár a folyamat viszonylag rövidnek és

egyszerűnek tűnhet, néhány részegysége bővebb kifejtésre szorul. A mintát felhelyezése után úgy kell beállítani, hogy az okulárban lévő szátkereszt az első évgyűrűhatáron legyen. Lehetőség van a furatot vagy korongot a kéreg és a fabél felől is mérni, azonban ezt az irányt mindig meg kell adni a mérés előtt a programban. A mintát lehetőség szerint úgy kell elhelyezni a tárgyasztalon, hogy azt a mérés alatt ne kelljen mozgatni. Ha a minta a megfelelő pozícióban áll, megkezdődhet a mikroszkóp gyártója által forgalmazott szoftver beállítása. A paraméterezést minden minta mérése előtt meg kell ismételni, megadva a minta azonosítóját, faját, a mérés irányát, (ha ismert) a minta első vagy utolsó évgyűrűjének dátumát és a mérés pontosságát (0,1 mm, 0,01 mm, 0,001 mm). Ezek mellett opcionálisan számos egyéb adat is megadható mind a mintáról, mind pedig a mintaterületről, és megjegyzés is hozzáfűzhető. A beállítás után következik a mérés, melyet először a programban kell elindítani (pl. Start Measure). Ettől a pillanattól fogja a szoftver regisztrálni a tárgyasztal elmozdulását. A mikroszkópon található kar segítségével oldalirányba kell mozgatni a tárgyasztalt mindaddig, amíg az okulárban lévő szátkereszt a következő évgyűrűhatárhoz nem ér. Ekkor egy egérkattintással kell jelezni a programnak, hogy a tárgyasztal egy évgyűrűnyit mozdult el, majd folytatni a mérést, minden évgyűrűhatárnál kattintva egyet³. Az utolsó évgyűrűs szélesség regisztrálása után a programban le kell állítani az aktuális mérést (pl. Stop Measure), majd a felugró ablakban ellenőrizni, hogy a mérés előtt biztosan minden adat helyesen lett megadva. Amennyiben igen, az ablak bezárható, az első minta elkészült. Ezt követően az összes mintára el kell végezni a mérést.

3.3.2. Keresztdatálás

A keresztdatálás, ahogy arról már korábban esett szó, a dendrokronológia legfontosabb alapelve. Segítségével hozhatók létre azok a hosszú idősorok, melyek a későbbiekben az adott területen lévő évgyűrűs kormeghatározás alapját fogják jelenteni. A művelet során meg kell keresni azokat a mintákat, melyeknek van közös periódusa, majd összeilleszteni őket (4. ábra). Mivel a később felépíteni kívánt évgyűrű kronológia szempontjából rendkívül fontos, hogy az átfedő időszakok helyesen legyenek megállapítva, a laboratóriumok egy jellemzően három lépcsős műveletsort alkalmaznak a munka során, mely a következő elemekből áll: vizuális egyezés keresés, statisztikai alapú illeszkedésvizsgálat, próba-ellenőrzés (Nash 2002).

³ Ez a módszer a RINNTECH által forgalmazott mikroszkópokhoz tartozó TSAP-Win szoftverre vonatkozik. Más gyártók ettől eltérő mérési protokoll is alkalmaznak.

A keresztdatálás első lépésében az évgyűrűmintázatok alapján elkészített évgyűrűszélesség görbék vizuális összehasonlítása történik (Stokes-Smiley 1968). Az egyes épületekből vagy régészeti objektumokból előkerülő faanyagok ugyan lehetnek különböző korúak, de sok esetben egyazon erdőből származnak, így évgyűrűnövekedési ritmusuk hasonló lesz, ami lehetőséget biztosít a görbék szemmel történő összevetésére, és az átfedő időszakok keresésére. A vizuális egyezés vizsgálat a számítógépek egyeduralma előtt úgy zajlott, hogy a laboratóriumokban kinyomtatták az évgyűrűgörbéket, majd egy átvilágító asztalra helyezve őket, egymáson elcsúsztatva keresték az átfedő időszakokat. Manapság már különböző szoftvereket használnak, de a folyamat, és annak elve nem változott.

4. ábra. A keresztdatálás sematikus ábrája. (Schweingruber 1983 nyomán, módosítva)

Mivel még az egyazon területen növekedett fák évgyűrűi sem fognak teljesen megegyezni, ezért a szakemberek első körben nem a teljes évgyűrűgörbét hasonlítják össze, hanem úgynevezett marker gyűrűket keresnek. Ezek olyan pozitív vagy negatív kiugró értékekkel jellemezhető évgyűrűk, melyek valamilyen extrém külső körülményhez kapcsolódnak, ami jó eséllyel a teljes élőhelyre hatással volt. Ilyen lehet például egy egy vagy több évig tartó komoly szárazság, mely a szokásostól vékonyabb évgyűrűvel fog megjelenni a mintában (Fritts 1976), de marker lehet egy állománygyérítés okozta hirtelen évgyűrűszélesség megugrás, vagy sejten belüli sejtsűrűség ingadozás is. A lényeg, hogy olyan

tulajdonság legyen, ami egyértelműen azonosítható. Amennyiben ezek a marker jegyek összepárosíthatók, az előttük és az utánuk lévő időszak növekedési trendjét is meg kell vizsgálni, hogy teljes biztonsággal kijelenthető legyen, ugyanazon évben képződött évgyűrűkről van szó. Természetesen nem minden esetben áll rendelkezésre markáns marker jelleg a mintákban, ilyenkor kizárólag a trendek vizsgálatára kell támaszkodni.

A számítógépes statisztikai vizsgálat során egy program kiszámolja, majd egy korrelációs koefficiensben (r) megadja az átfedő időszakok kapcsolati szintjét, úgy, hogy minden egyes változást megvizsgál a közös periódusban, valamint tekintettel van az évgyűrűszélesség magnitúdójára és az évgyűrűgörbe lefutási irányának évről-évre való változására (Holmes 1983). Bár már ez a mutató is sok információval szolgál a minták szinkronitását illetően, de mivel nem veszi figyelembe az átfedő időszakok hosszát, ezért többnyire egy úgynevezett t értéket is kiszámolnak, mely tulajdonképpen az r szignifikanciájának mértékét adja meg az átfedés teljes hosszának tekintetében. Baillie és Pilcher (1973) $t=3,5$ -ben állapította meg azt az értéket ($p=0,01$), mely felett az egyezés elfogadhatónak tekinthető. Amellett, hogy a számítógépes eljárás lényegesen gyorsabb, mint a vizuális egyezés keresés, rendelkezik még egy érdekes előnnyel. Élő fák elvégzett vizsgálatok kimutatták, hogy a különböző egyedekből vett minták esetében nem jellemző a $t=10$ feletti érték, azonos fák esetében azonban előfordul. Így ha egy vagy több minta (pl. gerendák) 10-es t érték feletti mutatóval rendelkezik, nagy esély van rá, hogy ugyanazon egyedből származnak. Ilyen esetekben nem különálló mintaként kell őket kezelni, hanem görbéik összeillesztése után létre kell hozni belőlük egy közös évgyűrű adatsort.

Kétségtelen, hogy a statisztikai számításokon alapuló számítógépes módszer nagy precizitással képes megadni az átfedő időszakok pontos helyét, azonban minden illesztést ellenőrizni kell. Ennek egyik módja a korábban ismertetett vizuális módszer, a másik pedig egy úgynevezett próba-ellenőrzés. A módszer lényege, hogy ha egy adott periódust több évgyűrűgörbe is lefed (pl. A, B, C, D), akkor amennyiben C illeszkedik A-val, B-vel és D-vel is illeszkednie kell. Hasonlóképpen, ha D illeszkedik A-val és C-vel akkor B-vel is illeszkednie kell. Amennyiben akár csak egy esetben hibás illeszkedés tapasztalható, a keresztdatálást az adott szakaszon meg kell ismételni.

A keresztdatálás során egyes laborok elvégzik az évgyűrűgörbék standardizálását is, mely során kiszűrik a fák növekedési tulajdonságaiból adódóan az évgyűrűszélességekbe kódolt trendet, ezzel egy index adatsort kapva, ami alapján már elsősorban a klimatikus viszonyok által meghatározott görbe rajzolódik ki (Cook 1985; Wigley et al. 1987).

3.3.3. Mesterkronológia

A dendrokronológiai kormeghatározás alapfeltétele egy mesterkronológia megléte, melybe a datálendő minták évgyűrűgörbéit illesztik. Egy ilyen kronológia a különböző minták keresztdatálásával jön létre, és érvényességi területe alapján lehet lelőhelyi/termőhelyi, lokális vagy regionális. Előnye, hogy mivel nem csak egy egyed, hanem egy egész mintaterület, vagy adott esetben egy nagyobb régió évgyűrű információit egyesíti, így egy letisztultabb, és más kronológiákkal könnyebben összehasonlítható adatsor (Stokes-Smiley 1968).

Elkészítésének legegyszerűbb módja az egyes minták évgyűrűadatainak a keresztdatálást követő átlagolása, úgy, hogy az egy adott évben keletkezett évgyűrűk szélességeit összeadjuk, majd elosztjuk az évet reprezentáló minták számával. Manapság természetesen ezt az alap statisztikai eljárást is számítógépes programokkal végzik el. Miután a kronológia elkészült, az adott területről származó minták korolhatóak lesznek vele, ugyanis az idősor minden egyes évgyűrűjéhez pontos, naptári év párosítható (Čufar et al. 2008). Egyes minták mesterkronológiával történő kormeghatározása ugyanazon a keresztdatálási elven és technikán alapul, melyet az előző alfejezetben bemutattem, vagyis az átfedő időszak helyes meghatározásán.

A jelenleg leghosszabb évgyűrűkronológia egy speciális, tölgy-fenyő kombinált idősor, melyet német és svájci kutatók állítottak fel. Több éves munkájuk eredményeként készült el az 12460 évet, tehát a teljes holocént lefedő Hohenheim kronológia (Friedrich et al. 2004).

3.3.4. A módszer problematikája

Ahogy minden kormeghatározási módszernek, természetesen a dendrokronológiának is vannak hátrányai. Jellemzően ezek az alapanyag, tehát a fa élő szervezet voltából adódnak.

Első, és talán legnagyobb hátrányként említhető az erősen korlátozott időbeli lefedettség. A fák kivágásuk után felhasználásuk módjától függően gyorsabb vagy lassabb ütemben, de amortizálódni kezdenek. Ez a folyamat természetesen hatással van az évgyűrűszerkezetre is, módosíthatja, sőt, teljesen megsemmisítheti az eredeti mintázatot, ami az adott faanyag dendrokronológiai felhasználhatóságát alapvetően befolyásolja. Ezen természetes folyamat következtében a dendrokronológia a többi kormeghatározási módszerhez képest rövidebb időátfogással bír. Felhasználhatóságának maximuma jelenleg a leghosszabb kronológia végpontjával egyenlő, vagyis 12460 év (Hohenheim).

Második hátránnyként egy komplex probléma említhető: mit jelöl a megadott dendrokronológiai dátum? Egy régészeti ásatáson talált, vagy épületből vett minta esetén megadható, hogy a fát hány éves korában vágták ki. Azonban ez a művelet csak akkor lehet pontos, ha a minta rendelkezik a teljes kéreggel, vagy annak egy azonosítható darabjával. E nélkül ugyanis nem lehet biztosan kijelenteni, hogy az utolsó megszámlolt évgyűrű valóban az utolsó növekedési év eredménye (Nash 2002). A külső évgyűrűk hiánya egyáltalán nem ritkaság, ugyanis felhasználásuk során sok esetben eltávolítják a fatest külső, puhább, szíjácsnak nevezett részét, és csak a kemény gesztet munkálják meg, de az is előfordulhat, hogy a szíjács egy darabja az amortizáció során semmisül meg (Dean et al. 1996). Ennek következtében az adott minta kora nem állapítható meg éves pontossággal, azonban még így is jó közelítés adható meg. A fatesten belül a szíjács és a geszt aránya fajonként eltérő ugyan, de fajon belül (egy adott területen) jellemzően állandó érték (Grynaeus 2004), így ha a geszt-szíjács határ kijelölhető, 2-5 éves hibahatárral megbecsülhető az adott minta hiányzó évgyűrűinek száma. Ehhez a problémakörhöz szorosan kapcsolódik, hogy nem jelenthető ki egyértelműen, hogy egy adott fát a kivágása után azonnal felhasználták, így ha egy épület dendrokronológiai korolása történik, ezt mindenképp figyelembe kell venni. Egyes szerzők szerint akár 3-10 év is eltelhet a fák kivágása, és azok felhasználása között (Bauch et al. 1978), mely időre a megfelelő mértékű kiszáradás miatt van szükség. Szintén felmerül a kivágás-felhasználás problémaköre olyan nagy volumenű építkezések esetében, ahol rengeteg faanyagra volt szükség (pl. székesegyházak). Ilyen esetekben a fák kitermelése és felhalmozása jóval az építkezés előtt megkezdődött. Érdekes kérdés továbbá a már felépült épületek szerkezetében történő javítások, esetleg a szerkezet részben, vagy teljes mértékben történő átalakítása. Ilyen esetekben természetesen új, az épület korához viszonyítva akár jóval fiatalabb faanyagokra van szükség. Amennyiben egy javításon vagy felújításon átesett szerkezeti elem kormeghatározása történik kizárólag egy épületből, az nagymértékben befolyásolhatja a létesítmény datálásának pontosságát. További problémaforrás az esetleges újrafelhasználás. Megeshet ugyanis, hogy a vizsgált minta nem az adott épületben került először felhasználásra, így annak kormeghatározása szintén torzíthatja a későbbi eredményeket. A dendrokronológiai kormeghatározásnak nem csak időbeli, de térbeli korlátai is vannak, mivel a különböző klimatikus viszonyokkal leírható területek mintáiból felállított évgyűrűgörbék összehasonlíthatósága nagymértékben csökkenhet. Emiatt az sem mindegy, hogy az adott épületbe beépített faanyag honnan származik, a felhasználás helyétől mekkora távolságra nőtt, illetve lett kivágva (Grynaeus 2004).

A harmadik problémakör a mennyiség, mely két fronton is jelentkezik. Elsőként a már korábban említett minimális évgyűrűszámában egy mintán belül. Ez azért nagyon fontos, mert ahhoz, hogy egy évgyűrűmintázat egyedinek, vagy statisztikailag megfelelően illeszthetőnek legyen nevezve, 50, de legrosszabb esetben is 30 évgyűrűt kell tartalmaznia. Amennyiben ezt a számot nem éri el, kormeghatározásra nem használható (Mills 1988). A mennyiség kérdésének másik sarkalatos pontja a minták mennyisége egy adott évben a mesterkronológiában. Mivel az évgyűrűk növekedését számos paraméter befolyásolja, még az egy azon élőhelyen élő fának sem lesz teljesen egyforma évgyűrűmintázata, mely egy bizonyos mennyiségű zajjal jár a mesterkronológiában. Ezt a zajt, mely adott esetben befolyásolhatja a későbbi minták korolását, a lehető legtöbb minta átlagolásával lehet leghatásosabban csökkenteni. Tehát a mesterkronológia megbízhatóságának fontos mutatószáma, hogy egyes részeit hány minta reprezentálja. Amennyiben ez a szám alacsony (pl. 5 alatti), akkor az adott időszakban a mesterkronológiát bizonytalanabbnak tekintik.

3.4. Dendroklimatológia

A dendroklimatológia a dendrokronológia legismertebb és legszélesebb körben alkalmazott társtudománya, mely mára már önálló tudományterületként is értelmezhető. Alaptétele, hogy a külső klimatikus tényezők nagymértékben befolyásolják az évgyűrűk számos tulajdonságát, így a szélességüket is. Ez a kapcsolat legegyszerűbben úgy jellemezhető, hogy kedvező időjárási körülmények között vastag, míg kedvezőtlenek között vékony évgyűrűk keletkeznek. Ezen analógiát követve a méretbeli fluktuáció mértékének pontos megállapítása segítségével hosszú távú éghajlati adathalmaz nyerhető ki a fák évi növekményéből.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a szélességi növekedés dinamikája és a kialakult évgyűrűk karaktere egy rendkívül összetett rendszer számos elemének kölcsönhatásától függ, tehát egy klimatikus jellegű vizsgálat esetében már az adatfeldolgozás elején ki kell szűrni az évgyűrűszélességekből az úgynevezett nem-klimatikus hatásokat, melyek közül jellemzően az öregedési trend (*age-related trend*) a legerősebb, ami a növekedési idő alatt, a külső körülményektől független, folyamatosan csökkenő fejlődési dinamikát jelenti. Ezen folyamatnak köszönhetően az első évgyűrűtől távolodva egyre vékonyabb évi növekmény keletkezik, mely például a víz és a hormonok növekedésből adódó hosszabb szállítási távolságával magyarázható. Ahhoz, hogy ez a trend, mely értelemszerűen nagyban befolyásolja a kapott adatokat, eltávolításra kerüljön a nyers évgyűrűszélesség értékekből, az adathalmazon

egy úgynevezett standardizációs (*standardization*) eljárást kell elvégezni⁴ (Fritts 1976; Cook 1985) (5. ábra). A matematikai folyamat során a nem-állandó évgyűrűségelek sorozatok kvázi-állandó, relatív indexekké alakulnak át, melyek meghatározott átlaggal és homogén varianciával rendelkeznek (Cook et al. 1990). Az eljárás egy becslés görbe létrehozásán alapul, mely az öregedési trendet hivatott képviselni (G_t), és mellyel a nyers évgyűrűségelek adatok elosztásra kerülnek (R_t). A művelet végén egy relatív, dimenzió nélküli évgyűrűindex keletkezik (I_t) a következő módon:

$$I_t = \frac{R_t}{G_t}$$

A standardizálás végeredményét alapvetően befolyásolja a G_t görbe kialakítása, melyre számos különböző matematikai eljárás létezik. Fontos azonban megjegyezni, hogy tökéletes megoldás nem létezik a zajszűrésre, sőt, az esetek többségében a kiszűrni kívánt trenden kívül klimatikus eredetű jel is távozik az adatsorból (Cook et al. 1995; Briffa et al. 1998).

5. ábra. Két eltérő standardizációs eljárással becsült öregedési trend.

A standardizáláson kívül a dendroklimatológia számos egyéb statisztikai eljárást és mutatószámot alkalmaz. Előbbiek közül, a dolgozat témájához igazodva⁵, legfontosabb

⁴ A standardizálás nem csak az öregedési trend kiszűrésére kínál megoldást, de az általa elkészített indexek a különböző területek, vagy akár a különböző egyedek sokszor rendkívül eltérő évgyűrűségeit könnyebben összehasonlíthatóvá teszi. Ezen kívül az egyedi sorozatok átlagolásával elkészített területi kronológiák létrehozása során is fontos elvégezni a standardizálást, mert a nyers adatokkal való munka során a szélesebb évgyűrűértékekkel rendelkező egyedek nagyobb hatással vannak az átlagra, mely torz eredményt generálhat.

⁵ Abban az esetben, ha egy adott dendroklimatológiai vizsgálat célja valamilyen klímarekonstrukció (pl. csapadék), az adatsorok elkészítése, ellenőrzése és hitelesítése során is több, speciális statisztikai eljárást alkalmaznak. Mivel jelen értekezés nem tartalmaz rekonstrukciót, ezen eljárások ismertetését mellőzöm.

kiemelni a minták közti keresztkorrelációt (R_{bar}) és a mintákból kifejezhető populációs szignált (EPS, *Expressed Population Signal*). Mindkét eljárás a standardizálással gyakorlatilag egy időben történik, és eredményeik alapján már az adatfeldolgozás korai szakaszában megállapítható, hogy egy adott mintaegyüttes alkalmas-e klimatikus jellegű évgyűrűvizsgálatra. Mindkét művelet mozgóablakos rendszerben dolgozik. Az R_{bar} az évgyűrűsorozatok közti átlagos Pearson-féle korrelációs együtthatót adja meg (Briffa et al. 1992), míg az EPS egy becslést végez arra, hogy az adott kronológia, mely véges számú elemből áll, milyen mértékben egyezik azzal az elméleti kronológiával, ami végtelen sok minta vizsgálatával állna elő (Wigley et al. 1984). Pontos szignifikancia szint egyik művelet esetén sem adható meg, azonban az R_{bar} esetében a 0,2 feletti értékeket már megbízhatónak tekintik, míg az EPS esetében ez az érték 0,85 (Wigley et al. 1984) vagy 0,9 (Méria et al. 2013).

4. ANYAG ÉS MÓDSZER

4.1. Mintaterületek

A mintaterületek kiválasztása során fontos szempont volt, hogy a vizsgálni kívánt időszakot, jelen esetben az elmúlt száz évet, recens, élő fákból származó mintákkal tudjam átfogni. Bár Magyarországon sok helyen található kisebb-nagyobb mennyiségű erdeifenyő, a hazai erdőgazdálkodási berendezkedés miatt a fákat nyolcvan éves koruk környékén kivágják (Márkus Rita, szóbeli közlés). E miatt a legtöbb erdeifenyővel borított területen száz évnél idősebb példányok nem, vagy csak igen kis számban fordulnak elő. Lényeges szempont volt továbbá, hogy a mintaterületek eltérő termőhelyi tulajdonságokkal rendelkezzenek, ezáltal a kapott adatok elemzése és összehasonlítása egy összetettebb eredményhalmaz létrehozásának lehetőségét vetítette elő.

A mintaterületek klímaviszonyainak jellemzése során a teljes vizsgálati időszakot lefedő griddelt CRU TS 3.23 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Harris-Jones 2015) adatbázist használtam. A fejezetben szereplő értékek az 1915-2014-es időszak átlagolt és összegzett adatai, melyeket a KNMI Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>) segítségével nyertem ki az adatbázisból.

4.1.1. Bakonyalja

A Bakonyalján található az ország egyik legkülönlegesebb és legidősebb erdeifenyvese, mely a közel 30 km² területű Fenyőfői homokvidéken, Fenyőfő és Bakonyszentlászló között

helyezkedik el (6. ábra). A Fenyőfői Ősfenyvest (N47°21', E17°45') nyugatról Bakonykoppány és Bakonyszücs, keletről pedig Bakonyszentlászló és Vinye határolja, maximális szélessége 3-4 km, hosszúsága pedig 10-15 km. Tengerszint feletti magassága nem haladja meg a 300 métert, azonban sehol nem csökken 250 méter alá (Majer 1988). Annak ellenére, hogy a Fenyőfői homokvidék viszonylag bő csapadékbevétellel rendelkezik, az erősen vízáteresztő anyakőzetnek köszönhetően, mely a talajfelszínre érkező vizet képtelen a megfelelő mértékben visszatartani, vízfolyásai általában időszakosak, nagy szárazság idején még a legnagyobb patakok is elapadnak. Nyugati területeiről a Gerence, keletről pedig a Cuha gyűjti össze, és vezeti el a vizet (Majer 1988).

6. ábra. Fenyőfő elhelyezkedése Győr-Moson-Sopron megyében (A) és a terület klímadiagramja (B).

A fenyves erdeifenyő állományának különlegességét az „ős” jelző adja, melynek jogossága, és egyáltalán a fenyves kora és eredete körül az elmúlt évtizedekben több ellentétes szemléletű megközelítés is napvilágot látott. Egyes korai elméletek szerint az itt megtalálható *Pinus sylvestris* állomány a fenyő-nyír kor (7000-8000 BC) reliktumának tekinthető (Majer 1988; Kevey 2008). A száraz és hűvös időszakban országsszerte elterjedt erdeifenyő társulások az azt követő melegebb mogyoró korban (7000-5500 BC) folyamatos visszahúzódásra kényszerültek. A Bakonyalja csapadékosabb és hűvösebb éghajlatának köszönhetően az ott megtalálható fenyőtársulások sikerrel vészelhették át ezt az időszakot, annak ellenére, hogy fajösszetételük a kontinentális sztyepp és erdősztyepp elemek betelepülésével megváltozott (Kevey 2008). A táj klímájának köszönhetően, melyet a fölé magasodó Magas-Bakony nagymértékben befolyásol, a melegebb tölgy (5500-2500 BC), valamint a hűvösebb és

csapadékosabb bükk I. (2500-800 BC) és bükk II. (800 BC - napjainkig) korok folyamatosan változó körülményei sem tudták kiszorítani a fenyvest a területről. Néhány újabb kutatás azonban máshová datálja az erdeifenyő megjelenését. Sümegi és munkatársai (2009) szerint a területen található zárt vegyeslombozatú fenyvesek már a jégkor végén, a Krisztus előtti XII. évezredben kialakultak, és egészen a neolitikum második szakaszáig, a Krisztus előtti V. évezredig fennmaradtak, majd a neolit települések kialakulása és a termelő gazdálkodás nyomán csak azokon a helyeken maradtak fenn, amelyek a termelő közösségek számára kevésbé használhatóak voltak (Sümegi et al. 2011). A népvándorlás, a későbbi erdőirtások, valamint a közelmúltban lezajlott, és az erdő fenyőállományában komoly károkat okozott bauxitbányászat következményeként a Bakonyalján jelenleg csak kisebb foltokban találhatók meg az egykori „őserdő” nyomai (Majer 1988), melyek meszes, másodlagosan kialakult futóhomokon és gyengén humuszos homokon fejlődnek (Szmorad-Tímár 2005).

Az erdő faállományának döntő többségét az erdeifenyő adja, mely a lombkorona szintet is uralja. Kora meglehetősen változó, a jóval száz év alatti egyedek mellett akár 160-170 éves fák is megtalálhatók a területen, ami hazánk átlagos erdeifenyő életkorát tekintve rendkívül magas szám. Az erdeifenyő mellett tölgy (*Quercus cerris*, *Quercus robur*, *Quercus petraea*), bükk (*Fagus sylvatica*), kőris (*Fraxinus ornus*), nyír (*Betula pendula*), akác (*Robinia pseudoacacia*) és feketefenyő (*Pinus negra*) is megtalálható kisebb-nagyobb mennyiségben (Majer 1988).

A Bakonyalja éghajlata mérsékelt meleg, évi átlaghőmérséklete 10,4°C. A legmelegebb júliusban regisztrálható (20,6°C), míg az év leghidegebb periódusa a január - 1,1°C-os átlaghőmérséklettel. Évi csapadékbevétele 650 mm körül mozog, melynek zöme a késő tavaszi-kora nyári (május-július) időszakban hullik, júliusi maximummal (75 mm). Legszárazabb hava a január (36 mm) (Harris-Jones 2015) (6. ábra).

4.1.2. Őrség

A legnyugatibb mintaterület az Őrség központi részén, Szalafő térségében található (N46°52', E16°21'). A magyar-szlovén határtól néhány kilométerre elhelyezkedő terület földrajzi beosztás alapján a Nyugat-magyarországi peremvidék nagytáján, azon belül pedig a Felső-Zala-völgy kistáján található (7. ábra). Természetföldrajzi adottságait tekintve a területet mély völgyek és lapos hegyhátak jellemzik, tengerszint feletti magassága 270 méter körül ingadozik. Talajviszonyai kedvezőbbek, mint a bakonyaljai mintaterületé, legelterjedtebb talajtípusa a barna erdőtalaj. Az Alpok közelségének köszönhetően az Őrség bőséges

csapadékbevétellel rendelkezik, melyet a Szalafőt környező vidékekről elsősorban a Zala-folyó gyűjt össze (Dövényi 2010).

7. ábra. Szalafő elhelyezkedése Vas-megyében (A) és a terület klímadiagramja (B).

Bár az ország legnyugatibb területe az erdeifenyő természetes elterjedési területének határán található (Euforgen 2009), a XIX. század végéig a lombos fafajok számítottak dominánsnak a térség erdeiben. A tölgy, a bükk és a gyertyán mellett, melyek azóta is nagy mennyiségben találhatók meg az Őrségben, a kizsákmányoló erdőgazdálkodás és a faszén égetés hatására kezdődött el az erdeifenyő felemelkedése, ugyanis a századfordulóra szinte teljesen eltűnő bükkösök helyét a spontán felnövő erdeifenyő erdők foglalták el. Mára a táj legjellemzőbb erdőtársulásai a mészkerülő elegyetlen erdeifenyves és a tölgy elegyes erdeifenyvesek lettek (Balogh 2013). Fenyőfajok közül megtalálható még a területen a luc (*Picea Abies*), valamint a boróka (*Juniperus communis*) is.

Az Őrség éghajlata kiegyensúlyozottnak mondható, a vegetációs struktúrát elsősorban az óceáni hatások alakítják, a kontinentális éghajlatra jellemző szélsőségek nem, vagy csak kis mértékben érvényesülnek (Dávid 2008). Csapadékbevétele magyarországi viszonylatban kiemelkedő, közel 800 mm évente, melynek nagy része a tenyészidőszakban, azon belül is a június-augusztusi periódusban hullik. Legnedvesebb hónapja a július (96 mm), míg legszárazabb a február (34 mm). Évi középhőmérséklete 10,2°C, legmelegebb hava a július, 20,2°C-os átlaghőmérséklettel (Harris-Jones 2015) (7. ábra).

4.1.3. Mecsek

A Mecsekben található mintaterület a hegység déli részén, Kővágószőlős közelében helyezkedik el (N46°6', E18°8'), magassága 350 és 400 méter között ingadozik (8. ábra). Éghajlata mérsékelt meleg–mérsékelt nedves (Dövényi 2010). A Mecsek-hegység kistáján található terület évi középhőmérséklete 10 °C, legmelegebb hava a július, míg leghidegebb a január. Az évi csapadékmennyiség a Bakonyaljáéhoz hasonlóan alakul, átlagosan 650 mm körül mozog, melynek nagy része a tenyészidőszakban hullik le. A mintaterület legnedvesebb hava a június, átlagosan 73 mm-es csapadékbevétellel. Legszárazabb hónap a január. A csapadékot az Orfői-patak gyűjti össze, majd a Baranya-csatornán át a Kaposba szállítja.

8. ábra. Kővágószőlős elhelyezkedése Baranya-megyében (A) és a terület klímadiagramja (B).

Hegyvidéki jellegéből adódóan az egész kistájat erdőtalajok borítják, melyek közül a mintaterületet agyagbemosódásos barna erdőtalaj fedi, mely jellemzően gyenge vízvezető, de nagy vízraktározó képességgel írható le. Az erdeifenyő elsősorban tölgygel és bükkal alkot elegyet (Borhidi 2003), és bár jelentősége elmarad az előzőekben említett mintaterületekhez képest, száz évnél idősebb egyedeket is tartalmaz az állomány.

4.1.4. Nyírség

A Nyírséget reprezentáló mintaterület a középtáj déli részén, Hajdú-Bihar megyében, a Dél-Nyírség kistájon található Vámspércs és Nyírmártonfa között (N47°33', E21°52') (9. ábra). Tengerszint feletti magassága 120 méter körül ingadozik, felszínét ÉÉK-DDNY-i csapású völgyek tagolják. A terület éghajlata mérsékelt meleg, száraz (Dövényi 2010), évi középhőmérséklete 10 °C, a legmelegebb júliusban, míg a leghidegebb januárban tapasztalható. Évi csapadékbevétele a többi mintaterülethez képest meglehetősen kevés, átlagosan 570 mm. A legcsapadékosabb hónap a július, míg a legszárazabb a január. A területre hulló csapadékot nyugati irányból a Derecskei-Kálló, keleti irányból pedig a Konyári-Kálló gyűjti össze, majd vezeti a Berettyóba. A környék vízfolyásai az év nagy részében alacsony vízhozamúak, mindössze tavasszal növekszik némileg a szállított víz mennyisége.

9. ábra. Vámspércs elhelyezkedése Hajdú-Bihar-megyében (A) és a terület klímadiagramja (B).

A kistájat talajtani szempontból a homoktalajok uralják, melyek közül a futóhomok talaj a legjellemzőbb (Dövényi 2010). Alföldi viszonylatban a területet borító erdőségek aránya magas, azonban a korábban jellegzetesnek számító homoki tölgyeseket ma már több helyen felváltották az ültetvények, melyek nagy része akác. Az erdeifenyő a Nyírségben sem őshonos, azonban magas szintű alkalmazkodó képessége miatt a gyenge termőképességű homoktalajon gyakori fajnak számít. A terület erdőgazdálkodása miatt az állomány nem tekinthető öregnek, az egyedeket 80 és 90 éves koruk között kivágják.

4.1.5. Egyéb adatforrás: Erdőleltár

Az értekezésben felhasználtam olyan adatokat is, melyek nem köthetők egyetlen mintaterülethez. A Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal (NÉBIH) Erdészeti Igazgatóságának Erdőleltára az egész ország területéről rendelkezik különböző fajok évgyűrűmintáival, melyek közül jelen munka során az erdeifenyőkből vett furatokat használtam fel (a mintavételezés módszertanáról a 4.2-es fejezetben ejtek szót) (10. ábra). Ezen minták esetében nem részletezem a mintaterületi sajátosságokat, ugyanis az egész országot lefedő hálózat számos eltérő tulajdonságokkal jellemezhető területet tartalmaz, melyek összefoglalása és külön taglalása nem csak rendkívül hosszadalmas lenne, de az értekezés gondolatmenetét is jelentősen megtörné.

10. ábra. Az Erdőleltárból származó furatok mintavételi pontjai.

4.2. Mintavétel és kronológiaépítés

A mintavételezés a Bakonyalján, az Őrségben és a Mecsekben is élő fákból, növedékfűrő használatával, mellmagasságban történt. Az egyedek kiválasztásakor fontos szempont volt, hogy azok dominánsak, egészségesek és elég idősök legyenek. A kiemelt 30 és 40 centiméter hosszú magokat a terepen ideiglenes tartórudakra rögzítettük, valamint egy esetben (Őrség) szívószálakba helyeztük. Ellentétben az imént felsorolt három mintaterülettel,

a Nyírségből nem furatokat, hanem korongokat dolgoztam fel, melyeket egy tervezett erdészeti vágás során, motoros fűrészszel vágtak le. Ebben az esetben a minták mérete (mind vastagsága, mind szélessége) és alakja rendkívül változatos volt. A NÉBIH Erdőleltárából származó furatokat szintén növedékfúróval emelték ki, az alap dendrokronológiai módszertant (Stokes-Smiley 1968) figyelembe véve, majd hármas csoportokban fa mintatartókra rögzítették őket. A minták méretében és állapotában ez az adatbázis jellemezhető a legjelentősebb szórással.

A legnagyobb mintamennyiség a Fenyőfői Ósfenyvesből származik. Ezen a területen két alkalommal végeztem mintavételezést, először 2011 telén, témavezetőmmel Dr. Náfrádi Katalinnal, majd 2014 tavaszán, egyedül. Az első alkalommal 52 egyedet fűrtünk meg, azonban minden fából csak egy mintát emeltünk ki. Másodszorra már jóval kevesebb, összesen 22 erdeifenyő alkotta a mintavétel alapját, azonban ez esetben már minden fából két mintát vettem, egymással ellentétes irányból. Erre azért van szükség, mert az évgűrűmintázat a fatest belsejében nem egységes, ugyanazon két évgűrűnek az egymáshoz viszonyított szélessége egyes pontokon eltérő lehet. Ezen fluktuáció kiküszöbölését teszi lehetővé a legalább két irányból származó furatok adatainak átlagolása. A Bakonyalját reprezentáló területi kronológia elkészítésekor az első mintavételezésből származó mintákat is felhasználtam, mert bár mindössze egy irányból történt a mintavétel, többségük magas kapcsolatot mutatott a második mintavételből felállított kronológiával.

A jelen értekezésben felhasznált adatok közül az Őrségből származók a legfrissebbek. A mintavételezést, melyben segítségemre volt a Szegedi Tudományegyetem Földtudományok Doktori Iskolájának PhD hallgatója, Borka Szabolcs, és az Őrségi Nemzeti Park munkatársa, Márkus Rita, 2015 őszén végeztem el. Szalafő térségében összesen 34 egyedet választottam ki, melyek mindegyikéből két mintát nyertünk ki ellentétes irányból.

A négy mintaterület közül a Mecsekből állt rendelkezésre a legkevesebb minta. Összesen hét erdeifenyőből, egyedenként egy furatot kaptam, melyek 2008-ban kerültek levételre Dr. Kern Zoltán által. Bár a mintamennyiség ebben az esetben lényegesen kisebb, mint például az Őrségben vagy a Bakonyalján, statisztikailag mégis elegendő, ugyanis a minimálisnak tekinthető 5 minta/év feltételnek a száz éves időintervallum nagy részében megfelel.

A nyírségi mintavételt a mecseki mintaterülethez (és természetesen az erőleltári mintákhoz) hasonlóan nem én végeztem. A 10 darab erdeifenyő korongot 2014 tavaszán kaptam Pályi Zoltánnak, a Nyírerdő Zrt. (akkori) munkatársának, valamint Dr. Kern Zoltán közvetítésének köszönhetően.

A NÉBIH Erdőleltárában számos rendkívül hasznos információ érhető el a hazai erdős ökoszisztéma állapotáról. Jelen értekezésben ezek közül olyan erdeifenyő furatokat szerettem volna felhasználni, melyek legalább 60 évgyűrűt tartalmaznak. Az összesen közel 300 mintából, melyek az ország minden olyan pontjáról származnak, ahol erdeifenyő állomány előfordul, 80 darab került hozzám az említett feltétel alapján (10. ábra). A mintavétel egy 4x4 km-es országos kiterjedésű rácsháló metszéspontjain zajlik úgy, hogy az egyes hálópontokon traktok kerültek kialakítása, melyek segítségével a hálópontokon 4 darab, a mintavétel szempontjából egymástól alapvetően független mintaterület alakítható ki. A trakt négy sarokpontja az állandó sugarú mintakörök középpontja, míg a mintakörhöz tartozó terület a mintaterület. Amennyiben a mintaterület fás területre esik, több szempont figyelembevételét követően megtörténik a mintavétel, mely során az adott fajokból egy furat kerül kiemelésre⁶. Mivel sajnos ezen minták esetében nem teljesül a két minta/egyed feltétel, így a végfelhasználás is némileg korlátozott, az adathalmazból származó eredmények statisztikailag gyengébbek lesznek/lehetnek, mint a többi területről származó furatok esetében. További probléma, hogy a feldolgozás során kiderült, a 2011-ben, 2012-ben és 2013-ban levett minták közül számos nem éri el a 60 évet, sőt egyes furatok még fele ennyi évgyűrűt sem tartalmaznak. E miatt az előzetes koncepciót átalakítva, a tervezett 60 év helyett egy rövidebb, csak az 1985 utáni időszakra koncentrálni elemzésbe vontam be ezeket a mintákat.

A mintavétel után a mintafeldolgozás első lépése a minták előkészítése volt. A furatok esetében ez a tartóelemekre való végleges ragasztást jelenti, melyet nagy körültekintés mellett (különös tekintettel a törött mintákra) általános, de erős tartást biztosító faragasztóval végeztem. A korongok méretükből kifolyólag nem igényelnek plusz rögzítést, így a Nyírségből származó minták esetében a mintaelőkészítés egy előzetes felületkezeléssel kezdődött az évgyűrűmintázat láthatóságának érdekében. Ezt követően minden korongon, egyedi elbírálás alapján, kijelöltem egy megfelelően széles sávot, melyek jobb, illetve bal oldala mentén a mintákat feldaraboltuk. Erre a lépésre elsősorban azért volt szükség, mert a nagy és nehéz korongok rendkívül megnehezítik a mintafeldolgozás további lépéseit, csakúgy, mint a mintákkal kapcsolatos logisztikát, ugyanakkor az így kapott darabok, lévén, hogy tartalmazzák a korong közepét, minden további nélkül alkalmasak a két irányból történő évgyűrűszélesség mérésre.

A minták előkészítése után minden esetben azok felületkezelését végeztem el, mely egy folyamatosan finomodó csiszolópapír sor alkalmazásával, csiszológép használatával zajlott. A

⁶ Az Erdőleltárban zajló munka módszertanáról bővebben a <http://portal.nebih.gov.hu/erdoleltar/> weboldal nyújt tájékoztatást.

minták csiszolása különböző eszközök segítségével folyt: a fenyőfői furatok, valamint a nyírségi korongok előzetes csiszolása esetében a mintákat egy, a faiparban használt nagyméretű és nagy teljesítményű csiszológép alkalmazásával felületkezeltem és felület-kezeltem, míg a mecseki és az őrségi minták szalagos kézicsiszoló használatával váltak feldolgozhatóvá. A csiszolópapír sor a legtöbb esetben P120-as durvasággal indult, majd változó mértékben finomodott, de soha nem történt kétszeres finomságnál nagyobb ugrás⁷. A folyamatosan finomodó papírok alkalmazására azért van szükség, hogy a minta felületét felpolírozva, minél jobban láthatóvá váljon annak évgyűrűszerkezete, sőt, megfelelő finomságú papír használata esetén annak sejtszerkezete is. A csiszolás során fontos figyelmet fordítani arra, hogy a minták felülete a lehető legkisebb mértékben térjen el a vízszintestől, aminek a mérés során van jelentősége.

A Mecsekből és az Erdőleltárból kapott minták már előkészített állapotban érkeztek hozzám, így azok felületkezelésére nem volt szükség.

A furatok és a korongok előkészítése után azok évgyűrűszélességeinek lemérése, valamint az egyes termőhelyi kronológiák elkészítése történt meg. A mérést két különböző módszerrel, évgyűrűmikroszkóp, valamint képanalitikai program segítségével végeztem el⁸. Előbbi esetében egy LINTAB típusú, kifejezetten évgyűrűvizsgálatokra kialakított mikroszkópot használtam, mellyel 0,01 mm-es pontossággal mértem le, majd a hozzá tartozó TSAP-Win alkalmazásban rögzítettem az egyes minták szélesség adatait. A méréseket az Eötvös Lóránd Tudományegyetem Természettudományi Karának Évgyűrűlaboratóriumában, valamint a *University of Ljubljana Wood Science and Technology* tanszékén végeztem el. A képanalízissel történő adatfeldolgozás előtt egy újabb előkészítési művelet elvégzése vált szükségessé, ugyanis ezen módszer alkalmazása során nem a konkrét minták, hanem azok digitalizált, kép formájában elmentett másolatait dolgoztam fel. A digitalizálást egy általános A/4-es méretű lapszkennel segítségével végeztem, az elérhető legnagyobb, 1200 dpi felbontással. Az így beolvasott képeken a szélességméréseket egy szakemberek által, elsősorban dendrokronológiai munkákhoz kifejlesztett szoftverrel, a Coorecorder-rel, valamint annak CDendro nevű moduljával végeztem. A mérés analógiája ebben az esetben sem más, mint mikroszkóp használatakor, a különbség mindössze annyi, hogy megfelelő kalibráció után a számítógép egerének segítségével történik az évgyűrűhatárok kijelölése, melyek távolságát a program rögzíti, és adott esetben, görbe formájában meg is jeleníti. A mérés mindkét módszer

⁷ A nyírségi minták esetében a sor a következő képpen épült fel: P120, P180, P240, P320, P400.

⁸ A mérés jellege alapján a következő csoportokba sorolhatók a minták: Bakonyalja, Őrség – mikroszkóp; Mecsek, Nyírség, Erdőleltár – képanalitika.

esetében a kéregtől a fatest belseje felé történt, és nem kizárólag a teljes évgyűrűt, de a korai és a kései pászta szélességeit is lemértem. A tavaszi és a kései pászta közti határvonalat vizuális úton, a két növekedési időszak markánsan elkülönülő sejtmorfológiája segítségével jelöltem ki.

Mivel a fák növekedésének első néhány évében kialakult évgyűrűk szélességét döntően nem a termőhelyük klimatikus tényezői befolyásolják, sok esetben a juvenilis farészben található gyűrűk szélességadatait eltávolítjuk az adatsorból. Jelen munka során nem kizárólag a fiatal fatest évgyűrűszélességeit töröltem, de azok az évgyűrűadatok is eltávolításra kerültek, melyek meghaladták a tézis által vizsgált száz éves periódust.

A kronológiaépítés sok esetben rendkívül hosszadalmas folyamat, azonban mivel jelen dolgozat során kizárólag élő fákból vett mintákkal dolgoztam, a lemerített szélességek átlagolásával hoztam létre az adott területekre vonatkoztatott nyers évgyűrűkronológiákat. Ezt a lépést a COFECHA nevű program végzi el, majd miután elkészült, az összes egyedi évgyűrűmintát összehasonlítja az átlaggal, és megadja a kettő korrelációs együtthatóját. Ez alapján megállapítottam, hogy mely görbék azok, amelyek egyáltalán nem illenek a többihez, valamint ellenőriztem az esetleges datálási hibákat is. Azokat a mintákat, melyek évgyűrűadatai csak kismértékű korrelációt mutattak az átlaggal ($r < 0,3$) eltávolítottam az adatsorból. Azok a statisztikai paraméterek, melyeket az évgyűrűszélességek jellemzésére alkalmaznak, úgy, mint, átlagos évgyűrűszélesség, szórás, elsőrendű autókorreláció, átlagos érzékenység, szintén ebben a fázisban kerültek meghatározásra.

4.3. Az elmúlt 100 év klimatikus elemzése

Annak érdekében, hogy megfelelő módon tudjam értékelni a megvizsgált erdőifenyő állományok klíma-növekedés kapcsolatát, és elsősorban annak időbeli változásáért felelős éghajlati folyamatokat, elemzést készítettem az elmúlt száz év klimatikus változásairól. Tekintve, hogy az értekezés témája nem a klimatológia, az elvégzett elemzés egy egyszerű, kizárólag a csapadék és a hőmérséklet ingadozásait számszerűsítő analízisként írható le. A változások szemléltetése érdekében a vizsgálati időszakot négy 25 éves periódusra osztottam, majd ezekben az intervallumokban, a SAI index (*Standardized Anomaly Index*) módszertanát követve (Katz-Glantz 1986) havi és évszakos, a referencia időszak szórásával normált anomália-értékeket számoltam, ugyanazon képletet alkalmazva mindkét éghajlati elem esetében:

$$X_a = \frac{X - X_m}{X_d}$$

ahol X a csapadék vagy a hőmérséklet értéke az adott időszakban (hónap, évszak), X_m a referenciaidőszak (1971–2000) átlaga, X_d pedig a referenciaidőszak szórása. Az anomáliaértékeken kívül mozgóátlagos számításokat is elvégeztem, melyek során szintén 25 éves szimmetrikus intervallumokat használtam.

A természetestől eltérő évgűrűkarakterek elemzése során a csapadék és a hőmérséklet együttes hatását, és a szélsőséges klimatikus viszonyok esetleges befolyását ariditási értékekkel számszerűsítettem. Az éghajlati szélsőségek vizsgálata során, melyek közül jelen értekezésben az aszályos időszakok évgűrűnövekedésre gyakorolt hatását vizsgáltam, fontos volt szem előtt tartani, hogy az egyes területek eltérő éghajlati adottságai miatt a szélsőségek nem feltétlenül következtek be egy időben, aminek természetes hatása az egyes évgűrűkarakterek jegyek eltérő megjelenése az adott években. Annak érdekében, hogy a mintaterületek a rájuk jellemző ariditási értékekkel legyenek leírva, egy aszályindexet is felhasználtam a munka során, melyet a korábban kiszámolt csapadék és hőmérséklet anomáliák segítségével készítettem el a következő módon:

$$AI = \frac{T - T_m}{T_d} - \frac{P - P_m}{P_d}$$

ahol T a hőmérséklet, T_m a referenciaidőszak (1971–2000) átlaghőmérséklete, T_d a referenciaidőszak hőmérsékletadatainak szórása, P a csapadék, P_m a referenciaidőszak csapadékátlag, P_d pedig a referenciaidőszak csapadékadatainak szórása. Száraz időszakok esetén az index pozitív értékeket vesz fel. Az aszályindex egyes időszakokra történő kiszámolása után annak időbeli változásait 25 éves mozgóátlaggal szemléltettem.

4.3.1. Az elemzés eredményei

Magyarország hőmérséklet- és csapadékviszonyai több kisebb-nagyobb változáson mentek keresztül az elmúlt 100 év során. Nagy területi átlagban elmondható, hogy a négy vizsgált 25 éves periódusból háromban csak kisebb ingadozások jelentkeztek, valamint az is, hogy a csapadékviszonyok meglehetősen kiegyenlítetten alakultak. A 11. ábrán jól látható, hogy míg az 1900-as évek elejéig éves átlagban csak kisebb területi átrendeződések történtek hazánk hőmérséklet-eloszlásában, addig az elmúlt 25 évben egy rendkívül markáns melegedési hullám növelte meg az éves középhőmérsékletet déli irányból. Ezzel szemben a csapadék területi és mennyiségi összetétele jóval kiegyensúlyozottabb, a kisebb ingadozásoktól eltekintve számottevő változások nem történtek.

11. ábra. Magyarország hőmérséklet- és csapadékviszonyainak alakulása az elmúlt 100 évben. A térképek a jelzett 25 éves periódusok átlagértékeit jelölik.

Érdekesség, hogy csapadékbevétel változékonyságának ilyen jellegű természete miatt a hazánk jövőbeli csapadékviszonyainak jellemzésére hivatott forgatókönyvek elkészítése is nehezebb, mivel kevésbé megbízható eredmények érhetők el a klímamodellezés során, mint a hőmérséklet esetében, ahol lényegesen nagyobb változékonyság tapasztalható (Bozó 2011).

A klímaviszonyokat részletesebben megvizsgálva még inkább láthatóvá válnak a csapadék és hőmérséklet értékekben mutatkozó változások, valamint az egyes évszakok eltérő jellegű trendjei is kihangsúlyozódnak. Bár az elmúlt bő negyed évszázadot jelentős melegedés jellemzi, ez elsősorban az év középső részét, a márciustól augusztusig tartó időszakot sújtja (12. ábra). Télen egy, a többi évszakhoz viszonyítva visszafogottnak mondható melegedés tapasztalható, őszen viszont szintén intenzívebb a hőmérsékleti értékek növekedése, azonban a nyári és a tavaszi melegedéshez képest a folyamat ebben az évszakban később, az 1990-es évek közepén indult el. A szezonális csapadékadatok jobban simulnak egymáshoz, a görbék kiegyensúlyozott futása évszacos szinten is meglehetősen egyenletes habitust kölcsönöz az adathalmaznak.

12. ábra. Szezonális csapadék és hőmérsékletrendek országos átlaga az elmúlt 100 évben.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a nagy területi átlagokból számolt adatok természetesen nem jellemzik jól az egyes élőhelyek éghajlati viszonyait, hiszen azokra számos területi tényező hat, ezzel módosítva az országos tendenciákat. Éppen ezért az egyes mintaterületek részletesebb elemzését is elvégeztem, annak érdekében, hogy elegendő információhoz jussak a későbbi klíma-növekedés kapcsolat váltakozásainak esetleges éghajlati befolyásáról.

Általánosságban elmondható, hogy a hőmérsékleti értékeket tekintve jelentős emelkedés történt minden mintaterületen az elmúlt 100 év során, továbbá az is, hogy ez a trend a nyári időszakot érintette leginkább. Közös jellemzője a területeknek továbbá, hogy a négy

időszakból, melyekre az elmúlt száz évet bontottam, az utolsóban tapasztalható az értékek ugrásszerű növekedése. A Bakonyalja hőmérsékleti képét a múlt század nagy részében egy, a referencia időszakhoz (1971-2000) képest jóval hűvösebb karakter jellemezte (13. ábra). Jelentős ingadozás egyik évszakban sem történt, leszámítva talán az 1940-1964 közötti időszakot, melynek telei a leghidegebbek voltak az elmúlt 100 évben. Az 1990-es évektől azonban addig nem tapasztalt emelkedésnek indultak a hőmérsékleti értékek, melynek hatására az addig többnyire 0 és -0,6 között mozgó anomália értékek 1,2-re emelkedtek nyáron, de még télen is, amikor a legkisebb volumenű volt a növekedés, elérték a 0,2-t.

13. ábra. Hőmérséklet anomáliák 25 éves átlagai a négy mintaterületen. Referencia időszak: 1971-2000.

Az adatok tanúsága szerint az Őrségben szinte ugyanazok a változások történtek, mint a Bakonyalján, sőt, azok amplitúdója is meglehetősen hasonlóan alakult. A különbség mindössze annyi, hogy Szalafő térségében többnyire, ha minimális mértékben is, magasabb anomália értékek jegyezhetők fel.

A harmadik dunántúli mintaterület is hasonlóságokat mutat az előzőekben tárgyalt adatsorokkal, azonban a Mecsekben már néhány nagyobb különbség is felfedezhető (13. ábra). Az elmúlt 100 év első 75 évében a nyári és az őszi időszakot tekintve a déli országrészben

alakultak legkiegyensúlyozottabban a hőmérsékleti viszonyok, az 1965-1989 közötti lehűlést leszámítva mindhárom vizsgálati periódusban 0 közelében maradtak. A múlt század vége azonban itt is markáns melegedést hozott, az anomália értékekben tapasztalható növekedés azonban elmaradt a bakonyaljától és az őrségitől is. A legkeletibb mintaterületen már lényeges különbségek írhatók le a dunántúli területekhez képest. Az 1940-1964-es időszak téli lehűlése itt is nyomon követhető, bár kisebb mértékű, mint a másik három esetben. A tél és a tavasz anomáliái a Nyírségben közelítik legjobban a referencia időszak értékeit az elmúlt 100 év első 25 évében. A legnagyobb különbség azonban a korábban tárgyalt mintaterületek hőmérsékleti viszonyaihoz képest nyáron és ősszel tapasztalható. A vizsgált időszak első 50 éve mindkét hónap esetében melegebb volt, mint az 1970-2000-es periódus, majd 1965 és 1989 között egy jelentős lehűlés történt, amit a többi mintaterületen is tapasztalt intenzív felmelegedés követett. A Nyírségben is a nyár hőmérséklete emelkedett a leginkább, hozzávetőlegesen akkora mértékben, mint a dunántúli területek esetében, azonban a többi hónap melegedése némileg elmaradt a Bakonyalján, az Őrségben és a Mecsekben tapasztaltaktól (13. ábra).

Az elmúlt 100 év csapadékbevitelében nagyobb területi különbségek láthatók. Az adatok alapján a Bakonyalja a téli és a tavaszi időszakot figyelembe véve jelentős bevitelcsökkenést szenvedett el, mely előbbi esetében fokozatosan, míg utóbbi esetében hirtelen zajlott le (14. ábra). Ezzel szemben nyáron a referencia időszakhoz képest a vizsgálati periódus nagy részében bővebb csapadék érte a területet. A csökkenés az Őrségben is leírható, bár kisebb mértékű, mint Fenyőfő térségében. Lényeges különbség azonban, hogy a nyári csapadék ezen a mintaterületen az 1965-1989-es időszakot leszámítva folyamatosan csökkent. A Mecsekben egyfajta kevert csapadékbevitel-történet látható. A télen történt változások az őrségi adatokkal mutatnak hasonlóságot, míg az év többi részében inkább a bakonyaljai trendekkel figyelhető meg párhuzam, melyek közül a legfontosabb, hogy a nyári időszakban a Mecsekben is növekedett a csapadékbevitel a referencia időszak adataihoz képest (14. ábra). A hőmérsékleti elemzés után nem meglepő, hogy a Nyírség csapadékviszonyait vizsgálva meglehetősen nagy különbségek írhatók le. A téli tendenciák még hasonlóak a dunántúli mintaterületekhez, bár azt meg kell jegyezni, hogy ez az egyetlen terület, ahol a december-január-februári periódus csapadékbevitelére a referencia szint alá csökkent a vizsgálati időszak végére. A tavaszi csapadékviszonyok a többi mintaterülettől teljesen eltérően alakultak, a négyből két 25 éves időszakban szinte megegyeztek az 1970-2000-es átlaggal, 1940 és 1965 között, valamint 1990 után azonban elmaradtak attól. Összességében azonban még így is kiegyensúlyozottabb csapadékbeviteli viszonyokról beszélhetünk, mint a másik három területen. A nyári időszakban a Nyírségben csökkent legjelentősebben a csapadék mennyisége

az elmúlt 100 év végére, melynek köszönhetően az utolsó vizsgált 25 év anomália értékei a referencia időszak értékei alá süllyedtek (14. ábra).

14. ábra. Csapadék anomáliák 25 éves átlagai a négy mintaterületen. Referencia időszak: 1971-2000.

Összegezve tehát elmondható, hogy a hőmérséklet mindegyik mintaterületen jelentősen emelkedett az elmúlt 100 év során, azonban a csapadékbevitel ezzel nem tudott lépést tartani, ami az aszályértékek folyamatos, és egyre gyorsuló növekedéséhez vezetett (Misi-Náfrádi 2017).

4.4. Az évgűrűkben lévő éghajlati jel vizsgálata

Bár az adatfeldolgozás első szakaszában már sor került egy átlagolásra, melynek köszönhetően elkészült egy nyers kronológia, ami kormeghatározásra már jól alkalmazható lenne, azonban éghajlati jellegű vizsgálatok esetében további statisztikai eljárások elvégzésére van szükség. Az eredmények megfelelő összehasonlíthatósága érdekében a munkamenet minden minta esetében azonos volt.

Az adatok standardizálását egy harmadfokú spline (*cubic smoothing spline, 50% frequency response at 67% length*) illesztésével végeztem (50%-os vágási frekvencia az egyes görbék 67%-ánál) (Cook-Peters 1981), majd az autókorreláció eltávolítása és egy kétsúlyú robusztus (*biweight robust mean*) átlagolás után jöttek létre az adott területekre vonatkozó reziduális évgyűrűindexek (Cook 1985). Az egyes évgyűrűindexekben lévő klimatikus jel megbízhatóságának tesztelése EPS (*Expressed Population Signal*) kalkulációval történt, melyet 25 éves mozgó ablakokban, egy éves ugrásokkal végeztem el, az általánosságban elfogadott 0,85-ös értéket tekintve a szignifikancia küszöbértékének (Wigley et al. 1984). Végül a minták közötti átlagos Pearson-féle korrelációs együtthatót (R_{bar}) is meghatároztam, melyet szintén mozgó ablakos eljárással, az EPS-sel megegyező paraméterek alapján kaptam meg. Minden standardizálásra, indexszámításra, valamint az adatsorok megbízhatóságának meghatározására irányuló műveletet az ARSTAN nevű programmal végeztem el (Cook-Krusic 2006).

A területi évgyűrűindexek és a klímaadatok kapcsolati szintjének meghatározásához bootstrap korrelációt használtam. Mivel az adott év évgyűrűsége kimutatható hatással lehet a megelőző év éghajlati jellege, minden korrelációt az évgyűrűnövekedést megelőző év májusától, az évgyűrűnövekedés évének októberéig végeztem el. A vizsgálat során nem kizárólag havi, hanem összevont, évszakos adatokat is elemeztem. A klímaváltozás hatásainak kimutatása miatt az évgyűrűnövekedés és a klímaadatok közti kapcsolatot időben mozgó Pearson korrelációval is meghatároztam, melyet 25 éves szimmetrikus csúszóablakokban számítottam ki.

A korábban ismertetett aszályindexet az évgyűrűnövekedés évének minden hónapjára, valamint az évszakokra is kiszámítottam. Az egyes időszakok ariditási viszonyainak évgyűrűnövekedéssel való kapcsolatát ebben az esetben is Pearson-féle korrelációs koefficienssel számszerűsítettem.

A bootstrap korrelációanalízist a DendroClim2002 (Biondi-Waikul 2004) nevű programmal, míg a csúszókorrelációt és a többi egyszerűbb statisztikai műveletet a Microsoft Excel nevű szoftverrel végeztem el.

4.5. Természetestől eltérő évgyűrűkarakterek

Bár az évgyűrűk szélességelemzése már önmagában is nagy mennyiségű kiinduló adatot biztosít egy klíma jellegű évgyűrűvizsgálathoz, az egyes évi növekmények karakterisztikájának további vizsgálata újabb elemzések elvégzését teszi lehetővé. Az ilyen jellegű vizsgálatok alapvető problematikája egy adott évgyűrű természetestől való eltérésének meghatározása. A

természetes évgyűrűnövekedés ugyanis nem egy egzakt, termőterülettől független tulajdonság, így az eredmények összehasonlíthatósága óhatatlanul nehézségekbe ütközhet. Munkám során az éven belüli sejtsűrűség ingadozások és a szokatlanul vékony évgyűrűk jelenlétét, valamint azok gyakoriságának váltakozását vizsgáltam. Előbbi esetében a természetestől eltérő jelleg különösebb akadály nélkül azonosítható, ugyanis a sejtmorfológia az esetek többségében egyértelműen felismerhetővé teszi valamiféle, elsősorban klimatikus, külső behatás jelenlétét a növekedés évében. Utóbbi esetében már nehezebben értelmezhető a szokatlanul vékony jelleg, ami természetesen nagymértékben függ az adott terület évgyűrűnövekedési tulajdonságaitól. Mivel a feldolgozott minták eltérő átlagos évgyűrűnövekedési dinamikával jellemezhető területekről származnak, a természetestől eltérő karakterek elemzése minden esetben egyedi elbírálás alapján történt.

Az éven belüli sejtsűrűség ingadozások és a szokatlanul vékony évgyűrűk meghatározását mikroszkóp alatt, vizuális úton végeztem el. Egy évet akkor tekintettem természetestől eltérő évgyűrűkarakterrel jellemezhetőnek, ha az egy adott fából levett mindkét mintában megjelent, és legalább három fában azonosítható volt a vizsgált évben⁹. Relatív gyakoriságukat az

$$F = \frac{N}{n}$$

képlettel fejeztem ki, ahol N azon egyedek számát mutatja, melyeken természetestől eltérő évgyűrűkarakter volt azonosítható egy adott évben, n pedig az abban az évben megvizsgált fák összegét. Annak érdekében, hogy az egyes években tapasztalható eltérő mintamennyiség módosító hatását kiszűrjem, elvégeztem a gyakoriság értékek stabilizálását Osborne et al. (1997) formulája alapján:

$$f = Fn^{0.5}$$

ahol F a korábbi lépésben kiszámolt relatív gyakoriság, n pedig az adott évet reprezentáló teljes mintamennyiség.

A művelet végén megkapott stabilizált gyakoriság értékek és a klímaadatok (beleértve az aszályindex adatait is) kapcsolatát Spearman-féle rangkorrelációval számszerűsítettem, az évgyűrűnövekedést megelőző év májusától az évgyűrűnövekedés évének októberéig. Az éghajlati jel vizsgálatához hasonlóan ebben a lépésben is elvégeztem hosszabb, szezonális időszakok klímaadatainak összevetését a természetestől eltérő növekedési jegyek stabilizált

⁹ Ez a feltétel sajnos a Mecsekből és az Erdőleltárból származó minták esetében nem teljesült, így azok vizsgálatakor kénytelen voltam egyedenként egy furat adataira támaszkodni.

gyakoriság adataival. A korrelációanalízisbe csak azokat az éveket vettem bele, amikor az adott speciális évgyűrűkarakter észlelhető volt.

Az adatelemzést ebben az esetben az SPSS Statistics 17. nevű programmal végeztem el. (Argyrous 2005).

A NÉBIH Erdőleltárából származó furatok adatait a speciális évgyűrűkarakterekből, egész pontosan a vékony évgyűrűk elemzéséből kapott eredmények egyfajta térbeli kiterjesztésére használtam fel. A munkafolyamat során minden furat 1985 után képződött évgyűrűjének szélességét lemértem (a korábbiakhoz hasonlóan külön kezelve a két pásztát és a teljes évgyűrűt), majd az átfogott időszakra meghatároztam minden terület átlagos évgyűrűszélességét. Ezt követően a vékony évgyűrűk előfordulásának adatait használva a legdominánsabb években kiszámoltam az egyes egyedek területi átlaghoz viszonyított évgyűrűszélesség anomáliáját. Az így kapott eredményeket a mintavételi helyek koordinátáinak segítségével adatbázisokba rendeztem, majd a Surfer 11 nevű program *Contour map* funkciójának segítségével megjelenítettem.

5. EREDMÉNYEK

5.1. Területi évgyűrűkronológiák

A disszertáció munkálatai során összesen három területi évgyűrűkronológiát készítettem el. Ezek közül kettő, a Bakonyalját és az Őrséget reprezentálók teljes egészében lefedik a vizsgálni kívánt száz évet. Fontos itt megjegyezni az 1. táblázatban látható adatok magyarázataként, hogy az értekezésben elemzett száz év végpontja az Őrségi kronológia végpontjához lett igazítva, így alakult ki az 1915-től 2014-ig tartó vizsgálati intervallum. Mivel a Bakonyalján korábban, 2014 elején történt a mintavétel, a fenyőfői kronológia csak 2013-ig tartalmaz adatokat. Az egy éves különbségnek köszönhetően a két kronológia közös intervalluma nem száz, hanem 99 év, azonban a minimális eltérés miatt mindkét idősort a disszertáció teljes vizsgálati időszakát lefedő adathalmazként értelmezem. A nyírségi és a mecseki mintaterületen rövidebb, azonban a későbbi munka szempontjából még elégséges, 86 illetve 81 év hosszúságú területi évgyűrűgörbét sikerült létrehozni (15. ábra).

A dendrokronológiában használt legfontosabb statisztikai eljárások eredményeit az 1. táblázat részletezi. Általánosságban elmondható, hogy az egyes kronológiák magas korrelációt mutatnak a területi átlaggal. A Bakonyalja, az Őrség és a Mecsek esetében a kései növekedési időszakban kialakult pászta szélesség-adatai jellemezhetők a legmagasabb kapcsolati szinttel,

míg a Nyírségből származó korongok esetében ez az érték némi meglepetésre a korai pászta esetében mondható el. Erdeifenyőkre jellemző módon, az évgűrű szélességének nagy részét a korai pászta szélessége adja, méretbeli ingadozását viszont a kései pászta szélességi változatossága, amit az LW kronológiák magasabb érzékenység értékei jelölnek.

1. táblázat. A területi kronológiák fontosabb statisztikai adatai.

MT	KRN	HSSZ	MM	CwM	MRW (mm)	MS	SD	AC1
Bakonyalja	RW	99 év 1915-2013	48	0,651	2,36	0,234	1,168	0,785
	LW			0,683	0,79	0,406	0,485	0,582
	EW			0,535	1,57	0,252	0,844	0,749
Őrség	RW	100 év 1915-2014	34	0,637	2,62	0,224	1,382	0,832
	LW			0,695	0,90	0,343	0,519	0,655
	EW			0,545	1,72	0,235	1,086	0,806
Mecsek	RW	94 év 1915-2008	7	0,563	1,46	0,297	0,902	0,708
	LW			0,643	0,49	0,526	0,324	0,463
	EW			0,435	0,97	0,307	0,689	0,693
Nyírség	RW	86 év 1928-2013	14	0,595	2,04	0,237	1,509	0,887
	LW			0,598	0,87	0,317	0,513	0,645
	EW			0,611	1,17	0,279	1,243	0,891

MT: Mintaterület, RW: Teljes évgűrű, LW: kései pászta, EW: korai pászta, KRN: Kronológia, HSSZ: Kronológia hossza, MM: Mintaszám (egyedszám), CwM: Korreláció a területi átlaggal, MRW: Átlagos szélesség, MS: Átlagos érzékenység¹⁰, SD: Szórás¹¹, AC1: Autókorreláció¹²

Az MS fajtól és területtől függően változik, de általánosságban elmondható, hogy (csakúgy, mint a szórás esetében) a minél magasabb értékek számítanak megfelelőnek (Grissino-Mayer 2001). Bár az érzékenység önmagában nem jellemzi egy kronológia éghajlati jellegű alkalmazhatóságát, azt mindenképp megmutatja, hogy egy adott egyed vagy állomány milyen mértékben reagál az évgűrűszélességet befolyásoló külső tényezőkre. Jelen kronológiák esetében közepes (0,20-0,29) és magas érzékenységről beszélhetünk (>0,30) (Grissino-Mayer 2001).

Az idősorok véglegesítése során csak a bakonyaljaiból távolítottam el mintákat, azokat, melyek túl alacsony kapcsolatot mutattak az átlaggörbével. A figyelmen kívül hagyott furatok

¹⁰ MS (*mean sensitivity*): Az évgűrűszélességek egyik évről a másikra történő relatív változása.

¹¹ SD (*standard deviation*): Az évgűrűszélességek szórása milliméterben.

¹² AC1 (*autocorrelation*): Az előző év hatását számszerűsíti az adott év évgűrűszélességére.

többsége az első mintavételkor került levételre, azonban annak ellenére, hogy meglehetősen nagyszámú minta adata lett törölve, a kronológia még így is a legmagasabb egyedszámmal rendelkezik.

15. ábra. A Bakonyalja (zöld), az Őrség (narancs), a Mecsek (sárga) és a Nyírség (kék) területi kronológiáinak nyers RW (A), EW (B) és LW (C) görbéi.

A mecseki kronológiát képviseli a legkevesebb fenyő azonban még így is statisztikailag elegendő mintát tartalmaz. A bakonyaljai és őrségi adatsorok a vizsgálati időszak középső részén érik el a legmagasabb replikációt, mely az őket felépítő egyedek korának nagyobb szórásából adódik. A nyírségi és a mecseki kronológiákban a minták kora nagymértékben hasonló, így az idősorok már az átfogott időszak első felében elérték a maximális egyedszámot. Általános jelenség, hogy a replikáció a kronológiák utolsó néhány évében csökken, melynek oka az egyes minták legkülső évgyűrűinek sérülése, vagy teljes elvesztése a mintavétel vagy a mintafeldolgozás valamely szakaszában. Jelen esetben a legfontosabb a nyírségi mintákra való

fokozott odafigyelés volt, ugyanis az eleve alacsony mintaszám miatt könnyebben eshet az egyedszám a statisztikailag elvárt alá (≥ 5 minta/év)¹³.

5.2. Klíma-növekedés kapcsolat

A klíma-növekedés kapcsolat több mutatóval is jellemezhető, attól függően, hogy a kapcsolat erősségét, jellegét, időbeli stabilitását, vagy az egyes egyedekben lévő közös jelet akarjuk leírni. Tekintve, hogy az egész állományra egységesen ható klimatikus viszonyok vizsgálata a fő célom, első és legfontosabb feladat a mintákban lévő közös jel erősségének és időbeli lefutásának elemzése. A mozgóablakos EPS kalkuláció a bakonyaljai, az őrségi és a nyírségi minták esetében is magas eredményekkel zárult, míg a mecseki adatok némileg elmaradtak tőlük. Az egyes területi kronológiák átlagos (teljes időszakra vonatkoztatott) értéke mindhárom szélesség-kategóriában (RW, EW, LW) az elfogadhatósági küszöbérték (Wigley et al. 1984) felett alakult, az egyetlen kivétel a Mecsek korai pásztájának eredményei (2. táblázat). Általános tendencia, hogy a teljes évgyűrű és a kései pászta szélességeit tartalmazó kronológiák magasabb EPS értékekkel és stabilabb időbeli lefutással jellemezhetők. Ez alól a nyírségi korongok adatai némiképp kivételt jelentenek, ugyanis esetükben az EPS értékek mindhárom kronológia vizsgálata során hasonló eloszlásúak. Az LW és RW adatsorok esetében is a bakonyaljai mintaegyüttes bizonyult a legerősebbnek, melyet az őrségi követ, szintén rendkívül magas EPS értékekkel. A mecseki és a nyírségi minták gyengébb közös jellel írhatók le, azonban az még így is statisztikailag megfelelő. Az EW kronológiák mind a négy mintaterületen jóval gyengébb, de még szignifikáns EPS értékekkel jellemezhetők, mely tendencia alól a fentebb említett mecseki EW adatsor az egyetlen kivétel. Érdekesség, hogy a korai pászta esetében a nyírségi adathalmaz rendelkezik a legstabilabb (bár nem a legerősebb) közös jellel (16. ábra). Az Rbar, tehát a minták közti csúszóablakos keresztkorrelációs elemzés szintén megfelelően magas értékekkel zárult. Bár erre a statisztikai mutatóra nincs meghatározott szignifikancia szint, az általánosságban minimálisnak tartott 0,2-es értéket mindegyik területi kronológia meghaladja. Hasonlóan az EPS-hez, ebben az esetben is meglehetősen magas értékek jellemzik a bakonyaljai és az őrségi kronológiákat. A legalacsonyabb korreláció a bakonyaljai mintaterület EW adatsorának első felében látható, ahol egy hosszabb időre a 0,2-es érték alá süllyednek az Rbar vizsgálat eredményei (16. ábra).

¹³ Természetesen a mecseki kronológia is az elfogadhatósági küszöbhez közeli mintamennyiséggel rendelkezik, de ott ez a veszély nem állt fenn, ugyanis az általam kapott minden minta tartalmazza a legkülső évgyűrűt és a kérget is.

Némileg meglepő módon a nyírségi kronológia esetében a korai pászta szélességei produkálják a legmagasabb és legstabilabb korrelációt. A másik három mintaterület adatsoraiban az LW kronológiák rendelkeznek ezzel a mutatóval. További érdekesség, hogy míg a teljes évgyűrű szélességeinek egymáshoz viszonyított kapcsolata a Bakonyalján és az Őrségen is erősödik az idősor fiatalodásával, a Nyírségben és a Mecsekben épp fordított tendencia látható.

16. ábra. A négy mintaterület EPS és Rbar értékeinek időbeli lefutása. A szürke vízszintes vonal az EPS-hez tartozó 0,85-ös szignifikancia szintet jelöli.

A mintákban lévő közös jel statisztikai vizsgálata alapján tehát elmondható, hogy bár időbeli stabilitásuk eltérő, összességében minden kronológia megbízhatóan erős közös szignállal rendelkezik, így azok alkalmasak a teljes állomány reprezentálására, ezáltal a kapott eredmények nem kizárólag az elemzett mintákra lesznek érvényesek, hanem a mintaterület teljes populációjára is.

2. táblázat. Az egyes kronológiák átlagos EPS és Rbar értékei.

	Bakonyalja			Őrség			Mecsek			Nyírség		
	EW	LW	RW	EW	LW	RW	EW	LW	RW	EW	LW	RW
EPS	0,93	0,98	0,97	0,93	0,97	0,95	0,79	0,89	0,85	0,91	0,90	0,92
Rbar	0,29	0,50	0,44	0,34	0,49	0,44	0,36	0,53	0,46	0,44	0,41	0,45

A klíma-növekedés kapcsolat vizsgálatának legáltalánosabb eleme az egyes éghajlati paraméterek (csapadék, hőmérséklet) mennyiségének évgyűrűnővekedésre gyakorolt hatása

egyedi vagy összevont időszakokban. A jelen disszertációban elvégzett vizsgálatok eredményei hasonló klíma-növekedés kapcsolatról tanúskodnak mind a négy mintaterületen.

A korai pászta szélességének változékonyságára jelentős pozitív hatással vannak az év első felének hőmérsékleti viszonyai, közülük is kiemelt a február és március, valamint az összevont december-január-február (DJF) időszak termikus körülményei (17. ábra). Érdekes, hogy a többi mintaterülettől eltérően a Mecsekben a megelőző év decemberének és az aktuális év januárjának hőmérséklete is jelentős befolyással bír az EW kronológia szélességeinek kialakulásában. Ezzel szemben a tavasz végi-nyári eleji magas hőmérséklet már ellenkező irányú hatást gyakorol a korai pászta növekedésére. A csapadék befolyása bár szignifikáns, meglehetősen alacsony, a május-júliusi időszakban tud némi hatást kifejteni.

17. ábra. Az éghajlati paraméterek és a korai pászták szélességeinek korrelációs kapcsolata. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$).

A korrelációanalízis eredményei jól mutatják a megelőző év hatását is az adott év egyes periódusaiban megfigyelhető évgyűrűnövekedésre. Az EW kronológiák esetében ez pozitív és negatív előjellel egyaránt jelentkezik: a Bakonyalján és a Nyírségben a növekedést megelőző év augusztusának, valamint szeptemberének bőséges csapadékbevétele elősegíti, míg az Őrségben a novemberi átlagosnál magasabb hőmérséklet korlátozza a következő év korai

A kései pászta és az éghajlati elemek kapcsolata lényegesen erősebb és egyértelműbb, mint a korai pászta esetében (18. ábra). A bakonyaljai, az őrségi és a mecseki kronológiák adataiban látszik leginkább a rendkívül erős függés a megfelelő mennyiségű csapadékbevételtől a nyári időszakban. A legmagasabb pozitív kapcsolat júliusban mérhető, de a júniusi és az augusztusi csapadékbevétel is szignifikáns hatással van az évgyűrűnövekedésre, mely eredmények alapján nem meglepő, hogy az összevont június-július-augusztusi (JJA) időszak egyértelmű dominanciával rendelkezik a kései pászta klíma-növekedés kapcsolatában.

55

pászta fejlődése szempontjából, melynek csapadékbevétele és hőmérséklete is szignifikáns kapcsolatban áll az LW kronológiák értékeivel. A Nyírségből származó adatsor némiképp eltérő módon viszonyul a klímparaméterek változásához, ugyanis ebben az esetben a csapadék pozitív befolyása lényegesen alacsonyabb, sőt, meglepő módon a februári és a márciusi hőmérséklettel való kapcsolat rendkívül magas, ami nem számít szokványos reakciónak az LW kronológiák esetében. Az ariditási index és a kései pászta szélességeinek kapcsolata jól mutatja a csapadék fontosságát ezen évgyűrűszakasz fejlődése során, ugyanis a július és augusztus, valamint a JJA időszak ariditási értékei szignifikáns, és a négyből három mintaterület esetében magas korrelációt értek el az LW kronológiával. Ebben az esetben is a nyírségi adatsor reagál másképp, alacsonyabb értékeket véve fel nyáron, valamint meglehetősen magasakat februárban és márciusban, ami nem jellemző a másik három mintaterületre.

A teljes évgyűrű szélességeit tartalmazó kronológiák és az éghajlati paraméterek kapcsolata jól egyesíti az eddigi tendenciákat. A nyári, azon belül is a júliusi csapadék dominanciája, valamint a késő téli-kora tavaszi időszak hőmérsékletének fontossága jól kihangsúlyozódik (19. ábra).

19. ábra. Az éghajlati paraméterek és a teljes évgyűrűk szélességeinek korrelációs kapcsolata. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$).

Érdekesség, hogy míg a kései pászta esetében a mecseki mintaterületen is a júliusi csapadék számított a legfontosabb limitáló faktornak, addig a teljes évgyűrű növekedésére a júniusi csapadékbevitel van legnagyobb hatással, mely kizárólag ezen a mintaterületen tapasztalható. Az RW kronológia vizsgálatakor is elkülönül a nyírségi adatsor a többitől. Esetében a nyári csapadék jelentősége lényegesen alacsonyabb, azonban a tél, és a vegetációs időszak leelejének termikus viszonyai fontosabbak. Az ariditási index korrelációs adatait vizsgálva ugyancsak jól kihangsúlyozódnak a különbségek az ország nyugati és keleti feléből származó kronológiák között. Míg a bakonyaljai az őrségi és a mecseki adatsor többnyire hasonló trendet követ, a nyírségiben található magas februári és márciusi értékek meglehetősen kilógnak a sorból. A különbség mellett azonban hasonlóságok is vannak a kronológiákban: mindhárom esetben a nyári szárazság számít a legerősebb negatív hatásnak az évgyűrűnövekedésre, amit az enyhe telek pozitív hatása némileg ellensúlyoz.

5.3. A klíma-növekedés kapcsolat időbeli stabilitása

Tekintve, hogy a klíma-növekedés kapcsolat időbeli stabilitásának vizsgálata kiemelt fontosságú az értekezés szempontjából, valamint, hogy nagy mennyiségű adat került bevonásra, az egyes mintaterületek külön alfejezetekben kerülnek elemzésre. Közös összehasonlításukat és az eredmények komplex értékelését pedig a 6. fejezet tartalmazza. A csúszókorrelációs vizsgálatba minden hónapot és évszakot bevontam, azonban a következőkben mindössze azok eredményeit fogom ismertetni, melyek a teljes vizsgálati időszakot tekintve szignifikáns értéket vettek fel valamely kronológiában.

5.3.1. Bakonyalja

A hőmérséklet és az évgyűrűnövekedés kapcsolata a késő téli-kora tavaszi időszakban, valamint a nyár második felében a legszorosabb a bakonyaljai mintaterületen, de májusban, októberben és a megelőző év szeptemberében is szignifikáns korreláció írható le a három kronológia közül legalább egyben. A kapcsolat megbízhatóságának elemzésekor a legtöbb esetben nagymértékű kilengések tapasztalhatók a korrelációs értékekben, mely gyenge stabilitásról árulkodik. A legjelentősebb változás a márciusi hőmérséklet évgyűrűszélességet befolyásoló hatásában állt be. A mindhárom kronológiában pozitívan szignifikáns értékkel leírható kapcsolat az elmúlt évszázad nagy részében stabil és erős volt (elsősorban az RW és az EW kronológiák esetében), azonban az 1970-es évek második felében ez a viszony lényegesen

megváltozott (20. ábra). Az addigi $r=0,4-0,5$ -ös értékek rendkívül rövid idő alatt a szignifikancia szint alá süllyedtek, sőt, egyes időszakokban negatív értéket vettek fel. Szinte azonos időben a februári hőmérséklet hatása is hasonlóképpen gyengült, azonban meg kell jegyezni, hogy e hónap esetében a jel eleve lényegesen instabilabb volt, mint márciusban, valamint, hogy a csökkenés csak egy rövid ideig tartott, mely után újra növekedésnek indultak a korrelációs értékek.

20. ábra. A Bakonyalja hőmérsékleti viszonyainak és évgyűűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

Az év középső részében júliusban, augusztusban és a nyári összevont időszakban figyelhető meg szignifikáns korreláció, ezúttal negatív előjellel. Ezen periódusok bár többnyire alacsonyabb korrelációs értékekkel írhatók le, azok időbeli változékonysága visszafogottabb, mint például márciusban. Mindhárom időszakban a kései pászta, valamint a teljes évgyűrű szélességeit tartalmazó kronológiák stabilitása a legjobb, lefutásuk pedig meglehetősen hasonló, ami természetesen nem meglepő, hiszen az év ezen időszakában a kései pászta növekedése dominál, melynek szélességi ingadozása jelentősen befolyásolja a teljes évgyűrű szélességét. Júliusban, augusztusban és a JJA időszakban néhány rövidebb periódust leszámítva $r=0$ és $r=0,4$ között mozognak a korrelációs értékek, némileg erősödő kapcsolati szinttel a vizsgálati időszak elején, közepén és végén. Utóbbi megállapítás azonban csak a júliusi és az augusztusi korrelációkban figyelhető meg, a JJA időszakban ezt a tendenciát vélhetően a júniusi értékek nyomják el. A teljes vizsgálati időszakot tekintve a téli (DJF) hőmérséklet adatok a teljes évgyűrű és a korai pászta szélességeivel tudtak szignifikáns kapcsolatot felmutatni. Mindkét esetben csökkenő korreláció jellemzi a múlt század első felét, majd a közepétől a végéig egy emelkedő, majd egy stagnáló szakasz következett, $r=0,2$ és $r=0,5$ közötti értékekkel. Ez után azonban egy rendkívül hirtelen és markáns zuhanás következett be a kapcsolati szintben, melynek köszönhetően az addig pozitív hatás teljesen eltűnik (20. ábra). A száz éves korrelációanalízis során szignifikáns mértékű (negatív) kapcsolat jelentkezett az októberi hőmérséklet és a kései pászta szélességváltozása között. A csúszókorrelációs elemzés során láthatóvá vált, hogy ez a jel sem mondható stabilnak, sőt, a kapcsolat az elmúlt száz évben folyamatosan gyengült, olyannyira, hogy a vizsgált időszak végére mindössze $r=0,1$ és $r=0,2$ között ingadozott. Ennél érdekesebb az évgyűrűnövekedést megelőző év szeptemberének termikus hatása a következő évi növekményre. Meglepő módon a múlt évszázad elején még meglehetősen magas pozitív befolyással bírt a kései pászta növekedésére, azonban ez az évszázad végére teljesen eltűnt, sőt az elmúlt néhány évtizedben már szignifikánsan negatívvá vált.

A csapadék és az évgyűrűnövekedés kapcsolatrendszerében a nyári időszak a legfontosabb, azon belül is a július. Ennek tudatában különösen érdekes a tendencia ami ezen hónap korrelációs értékeit jellemzi. Hasonlóan a márciusi hőmérséklethez, a júliusi csapadék is stabil és magas kapcsolati szinttel írható le a kései pászta és a teljes évgyűrű szélességadatai esetében. Azonban, szintén analóg módon a márciusi hőmérséklettel, a múlt század második felében egy csökkenő trend vette kezdetét, melynek hatására az egyes kronológiák a korábbi magas értékekről a szignifikancia szint közelébe, vagy adott esetben az alá estek vissza (21. ábra). Ezzel ellentétes folyamat játszódott le a júniusi csapadék esetében: közel azonos időben

a júliusi csökkenéssel, a júniusi értékek emelkedni kezdtek, ezzel például a kései pászta az addig stabil $r=0,2$ körüli átlagról $r=0,3$ -ra, sőt egy ideig $r=0,5$ fölé növekedett. Az augusztusi korrelációs értékekben szintén némi visszaesés tapasztalható, de a teljes időszakot figyelembe véve, még ez a hónap mondható a legstabilabbnak. Az évgyűrűnövekedés szempontjából szerencsés, hogy a júliusi csapadék hatásának csökkenését a júniusi ellensúlyozni tudta, így az augusztus kismértékű kilengése miatt az összevont nyári időszakban egy magas és stabil kapcsolat látható a kései pászta és a teljes évgyűrűsége esetében is.

21. ábra. A Bakonyalja csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

A májusi hőmérséklet időbeli korrelációjának tendenciája meglehetősen hektikus, a legalacsonyabb értékek $r=-0,1$ körül, míg a legmagasabbak $r=0,5$ körül alakulnak. Mivel a márciusi és az áprilisi csapadék nem gyakorol számottevő befolyást az évgyűrűnövekedésre, a március-április-május (MAM) időszak időbeli korrelációs trendje a májuséhoz hasonlóan alakul. A Bakonyalján a növekedést megelőző év augusztusának csapadékbevétele is szignifikáns kapcsolatban áll az következő évi növekmény szélességével, egészen pontosan a korai pászta fejlődésével. A csúszókorrelációs adatokból látszik, hogy a múlt évszázad közepétől a megelőző év augusztusi csapadéka egy többé-kevésbé stabilan növekvő pozitív hatást gyakorol az évgyűrűk növekedésére, mely tendencia nem csak az EW, de a másik két kronológiában is jelen van.

Az ariditási index és az évgyűrűnövekedés kapcsolatának időbeli változékonysága meglehetősen eltérő az egyes hónapokban, azonban a három évgyűrűkronológia jellemzően ugyanúgy reagált az ariditási trendek változására. Januárban, februárban és májusban elsősorban a korai pászta tudott szignifikáns kapcsolatot elérni az ariditási indexszel, azonban a jel meglehetősen gyengének bizonyult. Az elmúlt száz év nagy részében $r=0,4$ alatt (január, február), valamint $r=-0,4$ felett (május) mozgott, sőt az utolsó évtizedekben tovább gyengülve az $r=0,2$ és $r=-0,2$ közötti szintre süllyedt. Ezzel szemben júniusban a kapcsolat erősödése tapasztalható, a nyár első hónapjának szárazsági viszonyai a század közepi $r=0$ -ról $r=-0,4$ és $r=-0,5$ közé emelkedtek. Árnyalja a képet azonban, hogy a vizsgálati idő végén már egy újabb gyengülési hullám írható le, melynek hatására a kapcsolat ismét $r=-0,2$ alá esett vissza. Júliusban szintén némi csökkenés látható az ariditás évgyűrűnövekedésre gyakorolt hatásában, ami legkevésbé a kései pászta szélességét érinti, legjobban pedig a teljes évgyűrű adatait, mely a folyamat hatására jelentősen eltávolodott a szignifikancia szinttől az elmúlt 100 év utolsó évtizedeire. Az augusztusban jelentkező szárazságra hasonlóképpen reagáltak a bakonyaljai erdeifenyők, mint a júliusi folyamatokra. Ebben a hónapban is az LW kronológia jellemezhető a legmagasabb korrelációs értékekkel, melyek a szignifikancia szint alatt és felett váltakoznak a teljes vizsgálati időben. Nyáron, köszönhetően elsősorban a július és az augusztus stabil értékeinek, a teljes évgyűrű és a kései pászta szélességének változása szorosan és stabilan kapcsolódik az ariditási viszonyokhoz. Ahogy az a csapadék és a hőmérséklet esetében is látható volt, a megelőző év egyes időszakai befolyásolhatják, és befolyásolják is az adott évi növekmény szélességét. A Bakonyalján fejlődő erdeifenyők esetében az évgyűrűnövekedést megelőző év augusztusának és szeptemberének szárazsága is egyre erősödő negatív kapcsolatot mutat az évgyűrűk szélességének váltakozásával. Előbbi esetében a folyamat még viszonylag

új, és minden bizonnyal az elején jár, utóbbi esetében viszont már a múlt század közepe táján elindult, és a vizsgálati időszak végére az LW kronológiában az $r=-0,6$ -os szintet is elérte.

5.3.2. Őrség

Ahogy azt már korábban többször is hangsúlyoztam, a bakonyaljai és az őrségi adatbázis számos hasonlóságot mutat. Ezek közé tartozik a klíma-növekedés kapcsolat stabilitása is.

22. ábra. Az Őrség hőmérsékleti viszonyainak és évgűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

A februári és a márciusi hőmérséklet ezen az állományon csak a korai pászta és a teljes évgyűrű szélességeire tudott szignifikáns hatást gyakorolni. Előbbi esetében a szignál stabilitása az EW és RW kronológiákban gyengének mondható, bár lényegesebb jobb, mint a korábban ismertetett mintaterület esetében. Hirtelen csökkenés a kapcsolati fokban mindössze egyszer történik, a múlt század közepén, tehát a Bakonyalján tapasztalható két jellegzetes depresszióból csak az első írható le az Őrségben (22. ábra). A vizsgált időszak végéhez közeledve a korrelációs értékek stagnálása, sőt, az időszak legvégén azok lassú emelkedése figyelhető meg. Márciusban már több hasonlóság fedezhető fel a két mintaterület értékei között. Az elmúlt száz év első felében a márciusi hőmérséklet $r=0,3$ és $r=0,4$ közötti korrelációval kapcsolódott a teljes évgyűrű, valamint a kései pászta szélességének kialakulásához. Érdekes, hogy ebben az időszakban a később jelentősen megerősödő korai pászta még csak $r=0,2$ és $r=-0,2$ közötti korrelációt tudott elérni a hőmérséklet változásával (22. ábra). Egy hirtelen visszaesést követően, mely mindhárom kronológiát érintette, a múlt évszázad második felében stabil kapcsolat alakult ki az évgyűrűnövekedés és a márciusi hőmérséklet között. Azonban, hasonlóan a Bakonyalján tapasztaltakhoz, ez a stabil kapcsolat rendkívül rövid időn belül gyakorlatilag teljesen megszűnt. Télen, bár a februári korreláció erősödő kapcsolatot mutat, a teljes évszakot tekintve gyengülő hatás figyelhető meg, ami elsősorban a megelőző év decemberével való viszonynak köszönhető. A tél első hónapja ugyanis az évszázad középső részében magas korrelációs értékeivel stabilizálja az egész évszak kapcsolati szintjét (elsősorban az EW kronológiában), azonban az évszázad második felében befolyása csökkenni kezd. A visszaesés túl nagymértékű ahhoz, hogy a februári lassú emelkedés ellensúlyozni tudja, a januári hőmérséklet pedig teljesen súlytalan a növekedés szempontjából, így a DJF időszak korrelációja lassú, de egyértelmű csökkenésnek indult. A két nyári hónap, melyek szignifikáns kapcsolatot tudtak elérni az évgyűrűnövekedéssel, szintén meglehetősen nagy változékonyságot mutatnak. A júliusi hőmérséklet az RW és az LW kronológiákban a múlt század nagy részében stabil negatív hatást gyakorolt a szélességek váltakozására, az elmúlt néhány évtizedben azonban ez, csak úgy, mint márciusban, rövid időn belül eltűnt (22. ábra). Augusztusban a vizsgált időszak első felében magasabb korreláció tapasztalható, mint júliusban, egyes periódusokban az $r=0,5-0,6$ -os értéket is elérte. Később azonban ez a jel gyengült, sőt, az évszázad második felének nagy részében $r=0$ körül mozogott. Bár az 1900-as évek végén hirtelen újra felerősödött, ez nem mondható tartósnak, ugyanis egy rövid periódus után újra csökkenő tendenciát vett fel. Ezek után nem meglepő, hogy az összevont nyári (JJA) időszakban egy meglehetősen széles skálán mozgó, változékonnyal kapcsolható a hőmérséklet alakulása és az évgyűrűk szélességének fejlődése között. A korai pászta

fejlődésére még egy időszak, a növekedést megelőző év novemberének hőmérséklete van hatással az Őrségben. A csúszókorrelációs adatokból látható, hogy a szignifikáns negatív kapcsolat elsősorban a múlt évszázad elejének és közepének hagyatéka, ugyanis az elmúlt száz év második felében már meglehetően változékony, és sokszor az $r=-0,1$ körüli sávban mozgó kapcsolati szint a jellemző.

A csapadék, hasonlóan a Bakonyaljához, az Őrségben is nyáron éri el a legerősebb kapcsolati szintet, mely a teljes évgyűrű és a kései pászta szélességadataiban írható le (23. ábra).

23. ábra. Az Őrség csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

Hatásának stabilitása havonta eltérő: júniusban bár alacsonyabb, többé-kevésbé stabil, júliusban magasabb, de csak az LW kronológiában stabil, míg augusztusban a vizsgált időszak nagy részében alacsony és meglehetősen instabil is. Részletesebben elemezve látható, hogy a júniusi csapadék elsősorban a kései pászta szélességeire volt hatással az elmúlt száz év során, azonban érdekes, hogy az évszázad végére erős befolyása lett a korai pászta fejlődésében is, miközben a többi kronológiával is erősíteni tudta a kapcsolatát. Júliusban ettől eltérő módon az EW kronológiával már nem mutatható ki növekvő kapcsolat, ahogy az RW adatsorral sem, a csapadék ebben a hónapban mindössze a kései pászta szélességével tudta megtartani magas és stabil korrelációs szintjét. Augusztusban az elmúlt száz év legelején, valamint a második felének végén írható le relatíve magas korreláció, de hosszú ideig jellemzően nem tud megmaradni. Ezek alapján a teljes nyári időszakban (JJA) a teljes évgyűrű és a kései pászta növekedése is stabil és magas korrelációs értékekkel kapcsolódik a csapadék mennyiségéhez (23. ábra). A nyarat megelőzően, májusban, mindhárom kronológia hasonló utat jár be: a kezdeti emelkedő, majd a rövid stagnáló fázisok után a vizsgálati időszak végére csökkenő kapcsolati szinttel jellemezhetők. A nyarat követő időszakban azonban már sokkal egyértelműbb trend rajzolódik ki. Ősszel (SON) ugyanis a csapadék és az évgyűrűk szélességének kapcsolata folyamatosan erősödik az elmúlt száz év során, melynek hatására a kezdeti $r=-0,1-0,3$ -ról $r=-0,3-0,5$ -re emelkedik. Ahogy a Bakonyalján, az Órségben is hatással van a megelőző év bizonyos időszakának csapadékbevétele az évgyűrűk növekedésére. Jelen esetben ez a hónap a szeptember, melynek befolyása az egyes évgyűrűfejlődési időszakokra folyamatosan emelkedő pozitív trendet mutat a múlt század közepétől kezdődően.

A három évgyűrűkronológia szélességadatainak szárazsági viszonyokkal való csúszókorrelációs elemzése is több ponton mutat hasonlóságot a Fenyőfő térségében vett minták vizsgálatának eredményeivel. Az ariditási index januárban és februárban tapasztalható szignifikáns kapcsolata a korai pásztával a vizsgálati időszak első évtizedeit jellemzi, az elmúlt száz év utolsó negyedére januárban teljesen megszűnik, míg februárban $r=0,1$ környékére süllyed. Ennél érdekesebb a májusban látható trend, mely azon túl, hogy egy viszonylag stabil $r=0,2$ és $r=0,4$ között ingadozó kapcsolatot mutat a szárazsági adatok és a korai pászta szélességei között, az ariditás hatásának átfordulását is jelzi a kései pászta növekedésében. Az elmúlt 100 év első felében ugyanis pozitív, és egy ideig szignifikáns kapcsolat volt a két adatsor között, majd ez a tendencia teljesen megfordulva meglehetősen erős negatív kapcsolatba váltott ($\sim r=-0,4$). Júniusban is a korrelációs értékek erősödése tapasztalható mindhárom kronológiában. Az értékek negatív irányba történő emelkedése ráadásul annyira intenzív, hogy rövid időn belül $r=-0,2$ -ről $r=-0,6$ -ra változtak. Júliusban a Bakonyaljához hasonlóan némi

gyengülés írható le a kapcsolati szintben a vizsgálati idő második felére, mely ezen a mintaterületen is az RW kronológiát érinti leginkább. Augusztusban némi meglepetésre jelentős instabilitás látható a korrelációs adatokban: az elmúlt száz év első felében még erős, $r=-0,6$ és $r=-0,4$ közötti értékek jelentkezik az LW és az RW kronológiákban, azonban a múlt évszázad közepén egy meglehetősen hosszú ideig alacsony, $r=-0,3$ és $r=-0,2$ közötti szintre süllyednek. Ezután gyors erősödés tapasztalható, a kései pászta értékei egészen $r=-0,7$ -ig emelkednek, azonban a rövid javulás után újabb visszaesés következett be. A DJF időszakban a januári és februári korrelációs tendenciák ismeretében nem meglepő, hogy csökkenés tapasztalható a kapcsolati szintben, míg a JJA periódusban egy stabil, sőt a vizsgált időszak végén erősödő negatív hatás figyelhető meg. A megelőző év adatait vizsgálva elmondható, hogy a szeptember szárazsági viszonyai, csakúgy, mint a Bakonyalján, egyre erősödő negatív befolyással rendelkeznek az évgyűrűk kialakulásában, míg a december egy jelenleg csökkenő, de az elmúlt 100 év során többnyire szignifikáns kapcsolattal írható le az EW szélességek váltakozásával.

5.3.3. Mecsek

A bakonyaljai és az őrségi kronológiához képest az első különbség, hogy a mecseki idősor EW tagjában a januári hónap hőmérsékletével is szignifikánsan pozitív kapcsolat írható le a teljes vizsgálati periódusban, mely bár nem túl erős, időben meglehetősen stabilnak mondható (24. ábra). A februári és a márciusi termikus viszonyok Kővágószőlős térségében is fontosak az évgyűrűnövekedés szempontjából, azonban mozgókorrelációs tendenciáik gyakorlatilag az ellenkezőjét mutatják a korábban ismertetett két mintaterület eredményeinek, abban az értelemben, hogy a Mecsekben a februári hőmérséklet és a korai pászta egy stabil és helyenként magas kapcsolati szinttel jellemezhető a teljes vizsgálati időszakban. Sőt, a teljes évgyűrűszélesség és a hőmérséklet viszonya is hasonlóan jó, bár alacsonyabb korrelációs értékekkel írható le. Ezzel szemben a március termikus viszonyai, melyek a Bakonyalján és az Őrségben az utolsó két-három évtizedet leszámítva rendkívül domináns pozitív faktornak számítottak, a Mecsekben instabil, és a vizsgálati időszak nagy részében alacsony kapcsolati szintet értek el. Júliusban és augusztusban már több a hasonlóság a mintaterületek hőmérsékleti klíma-növekedés kapcsolatában: mindkét hónap esetében egy erős és állandó negatív befolyás írható le az elmúlt 100 év első felében, mely elsősorban az RW és az LW kronológiákban jelentkezik (24. ábra). A múlt század közepén azonban jelentős visszaesés történt a korrelációs értékekben, melynek hatására az addigi $r=-0,5$ -ös szintről $r=0,2$ és $r=-0,2$ közé esett vissza az adathalmazok kapcsolata. Érdekesség, hogy a negatív jelleg csökkenése júliusban a múlt

évszázad végén tulajdonképpen egy erősödő pozitív hatásba váltott át, mely mindhárom kronológiában észlelhető, de leginkább az EW és az RW idősorokat érinti.

24. ábra. A Mecsek hőmérsékleti viszonyainak és évgűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

Az évszakok esetében a tél és a nyár hőmérséklete befolyásolja szignifikánsan az évgűrűk növekedését. A DJF periódusban, bár a teljes szélesség és a korai pászta adatsora is szignifikáns kapcsolatot mutat a teljes időszakot tekintve, a csúszókorrelációs eredményekből látható, hogy stabil és erős kapcsolat csak az EW kronológia esetében alakult ki. Nyáron a klíma-növekedés kapcsolat a júliuséhoz hasonló trendet követ, mely erős negatív hatásról előbb

semlegesre csökken, majd pozitív irányban növekszik, bár ez utóbbi ebben az esetben nem jelenthető ki egyértelműen. A Mecsekben az évgyűrűnövekedést megelőző évből két hónap, a szeptember és a december hőmérséklete befolyásolja szignifikánsan a kialakuló évi növekmény szélességét. Előbbi esetében egy, az utóbbi néhány évtizedben erősödésnek indult negatív hatásról beszélhetünk, mely a kései pászta fejlődését érinti, valamint egy ezzel ellentétes, szintén növekvő, ám pozitív kapcsolatról, ami pedig a korai pászta növekedésére van hatással. A decemberi hőmérséklet és az évgyűrűszélességek változásának viszonya meglehetősen szélsőségesen alakult az elmúlt 100 évben. A vizsgált időszak első negyedében egy erősen negatív kapcsolat állt fenn, mely viszonylag rövid időn belül teljesen megfordult, és a múlt század közepén a tél első hónapjának hőmérséklete már jelentős pozitív hatással bírt az évgyűrűk fejlődésére. Azonban ez a tendencia nem tartott sokáig, az 1900-as évek végére az EW és az RW kronológiákban a szignifikáns kapcsolat gyakorlatilag megszűnt, az LW-ben pedig újra közel került a század eleji szinthez.

Az év első felében mindössze a január csapadékbevétele van szignifikáns befolyásolással az évgyűrűnövekedésre, mely a korai pászta szélességére gyakorolt hatásban merül ki. A két adathalmaz viszonyát az elmúlt száz év nagy részében a gyenge és a teljesen megszűnő kapcsolat váltakozása jellemezte, az utolsó körülbelül 30 évben azonban némi erősödés tapasztalható a korrelációs adatokban (25. ábra). Ahogy a többi mintaterületen, a nyári csapadék a Mecsekben is rendkívül fontos a fák növekedéséhez. Júniusban a teljes évgyűrű szélesség váltakozása és a lehulló csapadék mennyisége erős és stabil pozitív kapcsolatban van egymással. A viszony olyannyira állandó, hogy egyszer sem csökken $r=0,4$ alá, ami a nyári hónapokat tekintve egyedül itt fordul elő. A kései pászta sokáig hasonlóan erős korrelációt produkál a csapadékbevételel, azonban a múlt évszázad utolsó negyedében az értékek hirtelen csökkenésnek indultak, és egészen $r=0,2$ -ig süllyedtek. A csökkenő trend ezen a ponton megállt, majd a kapcsolat némiképp újra erősödni tudott. Érdekes, hogy ezzel a folyamattal egy időben a korai pászta és a csapadékmennyiség viszonya ugrásszerűen emelkedni kezdett egészen az $r=0,6$ -os csúcspontig, majd lassú gyengülésnek indult. A júliusi hőmérséklet, mely a Bakonyalján és az Őrségben is alapvető fontosságú, a Mecsekben csak az elmúlt 100 év első felében tudott igazán fontos tényező lenni, a század közepétől folyamatosan csökkent a szerepe, melynek hatására az addig $r=0,5$ feletti korreláció az RW kronológiával gyakorlatilag teljesen megszűnt, az LW adatsorral pedig hosszú időre $r=0,4$ alá süllyedt (25. ábra). Augusztusban is jelentős instabilitás mutatkozik a korrelációs értékekben, melynek elsődleges oka a múlt század közepén történt intenzív csökkenés a klíma-növekedés kapcsolatban, ami elsősorban a csapadék kései pásztára gyakorolt hatásában mutatkozik meg. Az összevont nyári időszakban szintén

tapasztható egy gyengülés a század közepén a korrelációs értékekben, azonban még azzal együtt is meglehetősen magas és többé-kevésbé stabilnak mondható kapcsolat áll fenn.

25. ábra. A Mecsek csapadékviszonyainak és évgűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

A téli csapadék hatása az évgűrűnővekedésre érdekes utat járt be az elmúlt 100 évben, ugyanis a korai negatív, majd semleges kapcsolat egyre erősödő (pozitív irányba) tendenciát mutat. Csakúgy, mint a hőmérséklet esetében, az évgűrűnővekedést megelőző évből a szeptember és a december csapadékviszonyai kapcsolódnak szignifikánsan az aktuális év szélességváltozásához. Szerepük hasonló: a múlt század elején mindkét hónap jelentéktelen

vagy csak kismértékű hatást tudott gyakorolni az évgyűrűnövekedésre, majd a korrelációs értékeik emelkedtek, azonban a vizsgálati időszak végére újra csökkenni kezdtek.

Az évgyűrűk szélességének váltakozása és a mecseki mintaterületre számolt aszályindex közötti szignifikáns kapcsolat januárban csak a korai pászta adataiban jelenik meg, ott viszont kisebb kilengéseket leszámítva állandónak tekinthető, sőt, a múlt évszázad második felében folyamatosan erősödik. Márciusban a hőmérsékletnél látott instabil kapcsolat írható le, mely a XX. század közepét leszámítva $r=0,3$ alatt maradt. A Bakonyaljától és az Őrségtől eltérő módon szinte egyik nyári hónap ariditása sem játszik stabilan negatív szerepet az évgyűrűk növekedésében, sőt, júniusban, júliusban és augusztusban is a korrelációs szintek csökkenése figyelhető meg. A két kapcsolati viszony, melyek többé-kevésbé tartósak tudtak maradni a júniusi AI értékek és a teljes évgyűrűszélesség, valamint a JJA időszak és a kései pászta között írhatók le. A téli szárazság elsősorban a korai pászta szélességét befolyásolja, míg a megelőző évben a szeptemberi ariditás az RW és az LW kronológiára is stabilan negatív hatással van, sőt, utóbbival a kapcsolat az elmúlt néhány évtizedben folyamatosan erősödött. A decemberi AI értékek, hasonlóan a hőmérséklethez tág, $r=-0,6$ és $r=0,5$ közötti skálán mozognak, ebben az időszakban stabil jelről nem beszélhetünk.

5.3.4. Nyírség

A Nyírségben az év eleji hőmérsékletnek kiemelt jelentősége van az évgyűrűk szélességének kialakulásában. Míg a januári termikus viszonyok csak a teljes évgyűrűszélességre, addig a februári és márciusi hőmérséklet az évgyűrűképződés minden szakaszára szignifikáns hatással vannak a teljes vizsgált időszakot figyelembe véve. A korreláció időbeli stabilitása azonban meglehetősen gyenge minden hónapban (26. ábra). Januárban csak a vizsgált időszak elején és végén ér el relatíve magasabb szintet, míg februárban csak a múlt évszázad végére emelkednek a szignifikancia szint fölé az EW és az RW adatsor hőmérséklettel való korrelációi. Márciusban a kései pászta és a teljes évgyűrűszélesség termikus viszonyokkal való kapcsolati szintjének időbeli stabilitása lényegesen jobb, mint a korábbi hónapokban, és a korrelációs értékek is megbízhatóbb viszonyt jeleznek. A nyári hónapok közül a teljes vizsgálati periódusban csak az augusztusi hőmérséklet, és meglepő módon csak az EW kronológiával ért el szignifikáns kapcsolatot, azonban hozzá kell tenni, hogy a jel mindössze egy rövid ideig, a múlt század középső részén tudott értékelhető magasságba emelkedni.

26. ábra. A Nyírség hőmérsékleti viszonyainak és évgűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

Télen hasonló a helyzet, mint februárban, a hőmérséklet az EW és az RW kronológiákra az elmúlt 100 év második felében, valamint egy rövid ideig az 1940-50-es években, az LW adatsorral kiegészülve, tudott érdemi hatást kifejteni a szélesség növekedésére. A megelőző évet vizsgálva a május és a szeptember termikus viszonyai értek el szignifikáns kapcsolatot a 100 éves korrelációelemzés során. A mozgóátlagos vizsgálatból azonban jól látszik, hogy mindkét hónapban gyenge jelről beszélhetünk.

27. ábra. A Nyírség csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

Ahogy az az 5.3-as fejezetben látható volt, a Nyírség csapadékbevitelének jelentősége elmarad a másik három mintaterületétől az évgyűrűszélességek kialakulásában. Februárban a két szignifikancia szint között a teljes tartományt lefedik a kronológiák, mely értelemsszerűen instabil jelről árulkodik (27. ábra). Júniusban és júliusban a teljes évgyűrűszélesség és a kései pászta adatai korrelálnak pozitívan a csapadék mennyiségével, azonban ez a kapcsolat mindkét hónapban jóval gyengébb, mint a korábbi mintaterületeken. Augusztusban már erősebb, az LW adatsor esetében hosszabb ideig a szignifikancia szint fölé jutó korreláció tapasztalható,

azonban ez sem tart ki a teljes vizsgálati időben, ugyanis az 1980-as évek környékén hirtelen $r=0,2$ alá esik, és bár később némileg erősödik, a szignifikáns szintet nem sikerül újra elérnie. Az összevont nyári időszakban a lehulló csapadék mennyisége tartósan szignifikáns hatást gyakorol a kései pászta fejlődésére, valamint rövidebb periódusok erejéig a teljes évgyűrű szélességének változására is. A megelőző év júliusának nedvessége az EW és az RW kronológiákat a vizsgálati időszak legelején képes érdemben befolyásolni, de a kapcsolat rövid időn belül teljesen eltűnik. A megelőző szeptember csapadéka a XX. század közepén hosszú ideig jelentős pozitív hatást gyakorolt a korai pászta, valamint rövidebb ideig a teljes évgyűrűszélesség növekedésére, azonban a század végére ezek a kapcsolatok teljesen eltűnnek, és helyettük a kései pászta és a csapadékmennyiség viszonya emelkedik a szignifikancia szint fölé (27. ábra).

Az aszályindex és a nyírségi erdefenyők évgyűrűinek szélessége közötti kapcsolat az év több periódusában is meghaladja a szignifikancia szintet, de stabilan, hosszú ideig egyszer sem sikerül felette maradnia. A legmagasabb korrelációk ebben az esetben is a nyári hónapokban, júliusban és augusztusban, valamint az összevont évszakos adatsorban írhatók le, stabilitásuk azonban messze elmarad a dunántúli mintaterületeken tapasztaltaktól. További érdekesség, hogy a téli szárazság ezen a területen éri el a legmagasabb pozitív kapcsolati szintet az EW és az RW kronológiákkal, mely ráadásul a jelenlegi tendenciákat figyelembe véve tovább erősödhet. Szintén növekvő korreláció figyelhető meg a megelőző év szeptemberének ariditási viszonyai és a kései pászta szélességei között (negatív irányba), mely trend azonban jól illeszkedik a többi mintaterület eredményeihez.

5.4. Speciális évgyűrűkarakterek

A természetestől eltérő évgyűrűkarakterek számában és a vizsgálati időn belüli eloszlásában is jelentős különbségek figyelhetők meg a mintaterületek között.

A vékony évgyűrűk jellegüket tekintve alapvetően három csoportba különíthetők el: a visszafogott növekedés csak a korai pásztát, csak a kései pásztát, vagy az egész évgyűrűt összességében érinti. Az értekezésben szereplő minták esetében döntő többségben van a kései pásztát érintő szélességcsökkenés, ezért a speciális évgyűrűkarakterek vizsgálata során nem elemeztem külön a három kronológiát. Ez az eredmény nem meglepő, ugyanis a kései pászta magasabb klímaérzékenysége, valamint a vékony évgyűrűket jellemzően kialakító tényezők időbeli eloszlása is a kései növekedési ciklus magasabb szélességcsökkenési hajlamát vetíti elő. Néhány esetben tapasztalható volt az egész évgyűrűt érintő visszafogottabb növekedés,

azonban ezek általában hosszabb vékony évgyűrű képződési szakaszok második vagy harmadik évében jelentkeztek, amikor már a megelőző év szélességcsökkenését kialakító tényezők hatást tudtak gyakorolni a következő évre is. (28. ábra) Ezekben az esetekben jellemzően szintén a kései pászta szélessége szenvedte el a nagyobb mértékű csökkenést (a megelőző időszakok átlagos értékéhez képest), a korai pásztában csak kisebb arányú visszaesés volt tapasztalható. Olyan eset azonban, hogy a visszafogott növekedés kizárólag a korai növekedési ciklusban jelentkezett, elhanyagolható mennyiségben fordult elő, legtöbbször a statisztikailag elfogadható értéket sem érte el. A jelen fejezetben említésre kerülő adatok tehát elsősorban a kései pásztában megjelenő szélességcsökkenésekre alapulnak.

28. ábra. Jellemző vékony évgyűrű képződési ciklus az 1960-as években a Bakonyalján. (saját felvétel)

Szokatlanul vékony évgyűrűből az Őrségi mintaterületen számoltam meg a legtöbbet, összesen 286 darabot, ami a teljes évgyűrűszám 9,6%-a. Ezt követi a Bakonyalja ahol összesen 119 (7,6%), valamint a Nyírség és a Mecsek, ahol 91 (8%), illetve 63 (10,6%) vékony évgyűrű képződött. A darabszámban jelentkező rendkívül nagy különbség jelen esetben nem az Őrség markáns aszályérzékenységéből, hanem a vizsgált minták mennyiségéből ered. A kapott eredményeket a teljes mintaszámmal elosztva az látható, hogy egyedenként átlagosan az Őrségben 8,6, a Bakonyalján 6,2, a Nyírségben 6,5, a Mecsekben pedig 9 vékony évgyűrű számolható meg.

Eloszlásukat tekintve hat periódus különíthető el, amiből ötben legalább két mintaterületen képződött vékony évgyűrű (29. ábra). Az egyetlen kivétel az 1932-es év, amikor kizárólag az őrségi területen volt leírható visszafogott növekedés. A leghosszabb, és összességében a legtöbb vékony évgyűrűt tartalmazó időszak 2000-től egészen 2015-ig tart, és mindössze két alkalommal szakad meg rövid időre. A mindhárom mintaterületen jelentkező rendkívül markáns időszak három csúcsponttal rendelkezik. Az első 2003, majd 2007 (kivéve Bakonyalja) és végül 2013, ami azonban már csak az őrségi és a bakonyaljai mintaterület adataiban követhető nyomon. Ezeken kívül az Őrségben a 2000-es, 2001-es, 2002-es és a 2012-es évek is rendkívül magas értékekkel rendelkeznek.

29. ábra. A négy mintaterületen regisztrált vékony évgyűrűk gyakorisági eloszlása.

A második legjellemzőbb vékony évgyűrű növekedési ciklus az 1990-es évek első felében zajlott, csúcspontját 1993-ban érte el, de az azt megelőző néhány év, valamint a nyírségi és a bakonyaljai adatsorban az 1994-es esztendő is meglehetősen sok mintában jelentkezett. Kiemelkedik ebben a periódusban az 1992-es év is, ami bár csak az Őrségi mintaterületen tudott igazán hangsúlyos lenni, ott megközelítette az 1993-as év rekord magas értékét. Az évszázad korábbi részében már ritkábban fordulnak elő vékony évgyűrű növekedési időszakok. A leghosszabb egybefüggő periódus a Bakonyalján írható le az 1960-as évek első és középső részében. Ekkor a visszafogott növekedés öt évet érintett, amire 2000 előtt kizárólag az 1990-es évek elején volt példa. Ebben az időszakban az Őrségben és a Mecsekben is tapasztalható a visszafogottabb növekedés, azonban lényegesen rövidebb ideig (29. ábra).

A vékony évgyűrűk gyakorisága és a klímaviszonyok közti kapcsolatban nagyobb területi különbségek tapasztalhatók, mint az évgyűrűk gyakorisági eloszlásában. Az Őrségben a korábban feltételezett kapcsolat írható le, mely szerint a vékony évgyűrűk kialakulását a megelőző év augusztusi, valamint a fejlődés évének májusi és augusztusi hőmérsékleti viszonyai befolyásolják döntően (2. melléklet). A hőmérséklet és a gyakoriság közti pozitív kapcsolat a JJA időszakban is természetesen meglehetősen erős, ezzel szemben pedig szignifikáns negatív hatás észlelhető a megelőző augusztus és az aktuális május MAM és JJA csapadékviszonyaiban, míg pozitív a novemberében. Ezen eredményeket tovább erősítik az ariditási indexel való összehasonlításból származó adatok, melyekből szintén a megelőző augusztus és az aktuális május és augusztus, valamint JJA időszak pozitív dominanciája, továbbá ezek mellett a MAM periódus szintén pozitív és a november negatív szignifikáns kapcsolata olvasható ki. Ezzel szemben a Bakonyalján a szokatlanul vékony évgyűrűk képződésében a megelőző év hőmérséklete júliusban és szeptemberben, valamint az aktuális év áprilisának ariditási viszonyai jelentik a legfontosabb pozitív befolyást. Ellenük a növekedés

évének márciusában jellemző hőmérséklet, valamint a júliusban lehulló csapadék hat, melyek közül utóbbi esetében írható le a legszorosabb kapcsolat az összes klímaparaméter közül (2. melléklet). A Mecsekben, bár a vékony évgűrűk eloszlása hasonló a korábban tárgyalt mintaterületekhez, a meteorológiai elemekkel való kapcsolatukban jelentős különbségek vannak. A Kővágószőlős környékéről származó minták szignifikáns kapcsolatot kizárólag egy hónappal mutatnak, októberrel, annak viszont mind csapadék-, mind hőmérsékletviszonyaival magas korrelációs értékekkel jellemezhetők (3. melléklet). Érdekesség, hogy ez a szoros kapcsolat mindkét esetben elsősorban a megelőző évben jelentkezik. A teljes kép ismerete érdekében azonban fontos megjegyezni, hogy ezen a mintaterületen fordult elő a legkevesebb évben vékony évgűrű. Mivel ezt a speciális évgűrűkaraktert mindössze 9 esztendőben regisztráltam megfelelő mennyiségben, a statisztikai vizsgálat során rendkívül magas szignifikancia szintet kell elérni ($p > 0,666$, 95%) a klímaparaméterek és a gyakorisági adatok kapcsolatának ahhoz, hogy elfogadható eredményekről beszélhessünk. Emiatt fordulhat elő az, hogy bár a növekedést megelőző év júniusának és augusztusának is magasabb a pozitív hatása a Mecsekben történő vékony évgűrű képződésre, mint az Őrség és Bakonyalja legtöbb időszakának esetében, azok mégsem tekinthetők szignifikánsnak. A nyírségi korongok elemzéséből származó gyakorisági adatok kizárólag az ariditási index júniusi és JJA értékeivel korrelálnak a szignifikancia szintet meghaladó mértékben (3. melléklet).

Az éven belüli sejtsűrűség ingadozás vizsgálatának eredményei még nagyobb területi és számbeli különbségekről árulkodnak. Ez a speciális évgűrűkarakter a Bakonyalján található meg a legnagyobb mennyiségben, összesen 180 darabot számoltam meg, mely a teljes évgűrűszám 11,6%-a. Mennyiségben a második helyen az Őrség áll 113 darabbal, mely mindössze 3,7%-a a mintaterületen összesen lemért évgűrűnek. Lényeges lemaradásban követi őket a Mecsek, ahol mindössze 34 darab IADF-et tartalmazó évgűrűt azonosítottam, azonban ez az alacsony mintaszám miatt összességében magasabb, 5,7%-os arányt tudott elérni az összes évgűrű tekintetében. Utolsó helyen a Nyírség áll, ahol szinte egyáltalán nem volt jelen az éven belüli sejtsűrűség ingadozás, összesen 9 olyan évgűrűt sikerült leírnom, mely tartalmazza ezt a speciális karaktert. Az eredmény abból a szempontból is érdekes, hogy a Bakonyalján egy mérsékelt erdőkre kevésbé jellemző évgűrűkarakter (IADF) nagyobb számban fordul elő, mint egy olyan, mely ezen a klímán rendkívül jellegzetes, ha valamilyen szélsőséges külső inger éri a fát (NR).

A szokatlanul vékony évgűrűkkel szemben az éven belüli sejtsűrűség ingadozás esetében nem, vagy csak nagyon nehezen lehet időbeli csoportokba rendezni az évgűrűkarakter megjelenését (30. ábra). A Bakonyalján az 1940-es évektől minden évtizedben

legalább egy évben megfigyelhető a normálistól eltérő sejtszerkezet, előtte azonban jóval ritkábban, mindössze három alkalommal (1916, 1917, 1918) fordult elő. Legnagyobb mennyiségben 1946-ban jelent meg.

30. ábra. A négy mintaterületen regisztrált éven belüli sejtsűrűség ingadozások gyakorisági eloszlása.

Az Őrségben ettől eltérő módon, épp a vizsgált száz év első felében gyakoribb az IADF, 1970 után mindössze két alkalommal, 1981-ben és 2012-ben regisztrálható. Legnagyobb mennyiségben ezen a mintaterületen is 1946-ban fordult elő. A Mecsekben mindössze egy évben, 1952-ben érte el ezen évgyűrűkarakter mennyisége a statisztikailag elfogadhatónak meghatározott 3 minta/év küszöböt. A Nyírség esetében nem csak trendszerű előfordulásról, de egyáltalán előfordulásról is nehéz beszélni. Az összesen megszámlolt 9 évgyűrűből, mely produkált sejtsűrűség ingadozást, mindössze egy évben, 1983-ban fordult elő statisztikailag megfelelő mennyiségű ebből a speciális évgyűrűkarakterből. Ebben az évben egyébiránt a Bakonyalján is képződött IADF.

Az éven belüli sejtsűrűség ingadozás gyakoriságában és időbeli eloszlásában tapasztalható rendkívül magas területi különbségek alapján feltételezhető volt, hogy markáns éghajlati kapcsolat nem lesz leírható. A Bakonyalján és az Őrségben is rendkívül kevés a szignifikáns befolyással jellemezhető időszak, előbbi esetében mindössze egy, a március (hőmérséklet), míg utóbbin három, a július, a szeptember (mindkettő csapadék) és az október (ariditás) ért el statisztikailag elfogadható értéket (1. melléklet). Tekintve, hogy a Nyírségből és a Mecsekből származó mintákban mindössze egyetlen évben érte el a sejtsűrűség ingadozás a megfelelő mennyiséget, így ezeket a mintaterületeket az adatelemzés ezen szakaszából kihagytam.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

6.1. A magyarországi erdeifenyő évgyűrűk szélességi növekedésének klimatikus feltételei

Az elmúlt száz év egészének vizsgálata alapján elmondható, hogy az elemzésbe vont mintaterületeken az erdeifenyő évgyűrűk szélességi növekedésére hasonló mértékben vannak hatással az egyes meteorológiai elemek, kiugró, trendszerű eltérésekről nem beszélhetünk. Az évgyűrűk teljes szélességelemzéséből a klímáparaméterek egy, az egész növekedési időszakot lefedő kapcsolatrendszerre rajzolódik ki, a korai és kései pászták különálló vizsgálatának köszönhetően pedig a hőmérséklet és a csapadék dominanciájának időbeli átbillenése is nyomon követhető.

Az eredményekből látható, hogy a négyből három mintaterületen az erdeifenyők szélességingadozását elsősorban a csapadék, annak is főleg a JJA időszakban lehullott mennyisége befolyásolja. Az egyes hónapok csapadékbevitelének évgyűrűnövekedéssel való kapcsolátelelemzéséből kiderül, hogy a Bakonyalján és az Őrségben a július, míg a Mecsekben a június csapadékviszonyai fejtik ki a legjelentősebb hatást az évi növekményre, ami jól illeszkedik a területek havi csapadékmaximumához. Némileg meglepetésre a Nyírségből származó adatsor hordozza a legalacsonyabb kapcsolatot a csapadékkal, a korrelációs értékek eloszlása azonban illeszkedik a dunántúli mintaterületek által kirajzolt képhez. A hőmérséklet a teljes évgyűrűszélességre lényegesen kisebb hatással van: az év elején, a késő téli-kora tavaszi időszakban direkt, majd nyáron indirekt módon befolyásolja az évgyűrű fejlődését. A magyarországihoz hasonló klimatikus és környezeti feltételekkel jellemezhető területeken a JJA időszak csapadékértékeinek pozitív, valamint hőmérsékletének negatív hatása rendkívül jellegzetes, ennek megfelelően hazai (Kern et al. 2013; Garamszegi-Kern 2014; Misi-Náfrádi 2016a,b; Misi-Náfrádi 2017) és nemzetközi tanulmányokban (Cufar et al. 2008b; Bikaj 2010; Michelot et al. 2012; Koprowski 2012; Panayotov et al. 2013; Koprowski 2013) is több ízben leírták már, örökzöld és lombhullató fajok esetében egyaránt. Éppen ezért különleges, hogy a vizsgált négy mintaterületből mindössze egyen, az Őrségben figyelhető meg típusosan ez a jellegzetes viselkedés, valamint fenntartásokkal leírható a Bakonyalján is. Ezzel szemben a Mecsekben és a Nyírségben az elmúlt 100 év során a nyári hőmérsékletnek nem volt kimutatható hatása a teljes évgyűrűszélesség váltakozására a korrelációs adatok alapján. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez egy árnyalt kép, ugyanis ahogy azt az 1. táblázat érzékenység értékei megmutatják, a szélességi variancia a kései pászták esetében minden mintaterületen

magasabb, ami azt jelenti, hogy az évgyűrűk végleges szélességi karakterét a korai pászta utáni növekedési ciklus során kialakult méret fogja megadni. Ennek értelmében a hőmérséklet valós befolyása az évgyűrűszélességre jobban elemezhető a kései pászta fejlődésére való hatása alapján. E mellett azt sem szabad elfelejteni, hogy az 5.3-as fejezetben bemutatott és a 6.2-es fejezetben részletesen tárgyalásra kerülő eredmények alapján a száz éves korrelációelemzés értékei egyes időszakokban jelentős instabilitással jellemezhető kapcsolati szint alapján alakulnak ki, mely a nyári hőmérséklet és a teljes évgyűrűszélesség viszonyát is érinti.

Az RW kronológiákon elvégzett elemzés eredményei alapján elmondható, hogy egy adott évben a hőmérséklet pozitív és negatív kapcsolatot is kialakít az évgyűrűk szélességével. A két egymással ellentétes hatás a korai és kései pászta szélességelemzése által még inkább kihangsúlyozódik. A korrelációs értékekből látható, hogy a növekedési időszak első felében, valamint az azt megelőző hónapokban a hőmérséklet egyértelműen uralja a klíma-növekedés kapcsolatrendszerét. Legjelentősebb befolyással februárban és márciusban bír, de a Mecsekben például az egész DJF időszakban észlelhető közvetlen hatása. A hőmérséklet pozitív kapcsolata az évgyűrűképződéssel az év ezen szakaszában jól ismert, hiszen az nem csak a hóolvadás intenzitására, és ezzel az elérhető nedvesség mennyiségére (Fritts 1976), de a rügyfakadás kezdetére is számottevő hatással van (de Luis 2014). Mindezek ellenére Magyarországon eddig a hőmérséklet és a korai pászta fejlődésének kapcsolatát erdőfenyőkön nem vizsgálták (kivéve Misi-Náfrádi 2016b). Az egyébként is rendkívül kisszámú hazai tudományos munka, mely külön értékeli az egyes növekedési ciklusok szélességének klimatikus kapcsolatát, az itthoni dendroklimatológiai trendeknek megfelelően, lombhullató fajok bevonásával készült (Kern et al. 2013). A kései pászta fejlődésével a hőmérséklet hatása átbillen, és bár az esetek többségében elmaradva az EW kronológiákban tapasztalt szinttől, a négyből három mintaterületen júliusban, augusztusban és a teljes nyári időszakban is szignifikánsan negatív kapcsolatot tud kialakítani. A korrelációs értékekből egyértelműen látható, hogy ez egy másodlagos, ám alárendeltnek semmiképp sem nevezhető szerep, hiszen bár az év ezen szakaszában a csapadék mennyisége a fő növekedést limitáló tényező, a hőmérséklet a párolgás szabályozásával a ténylegesen felhasználható csapadék mennyiségére lényeges hatással van. Ennek köszönhetően a LW idősorok és a termikus viszonyok kapcsolatrendszerében már megfigyelhető a teljes évgyűrűszélességből hiányzó, és a mérsékelt klímára és alacsony tengerszint feletti magasságra jellemző pozitív csapadék-dominancia mellett jelentkező negatív hőmérsékleti hatás. Az EW kronológiától eltérően a kései pászta és a klímaparaméterek ilyen jellegű viszonyát már Kern és munkatársai (Kern et al. 2013) is észlelték tölgyek évgyűrűtulajdonságait vizsgálva.

A csapadék és a hőmérséklet közösen fellépő hatását jelző ariditási index, és az egyes évgyűrűkronológiák korrelációanalízisének eredményei jelentős mértékben egységesítik az egyébként mintaterületenként változó képet, valamint kihangsúlyozzák a hasznosítható csapadék mennyiségének jelentőségét. Az AI értékekkel ugyanis olyan területek RW és LW kronológiái is szignifikáns kapcsolatot mutatnak, melyeken a hőmérséklet a teljes évgyűrű vagy a kései pászta, esetleg egyikük esetében sem volt erre képes.

6.2. A magyarországi erdeifenyők klíma-növekedés rendszerének időbeli stabilitása az elmúlt 100 év éghajlati viszonyainak tükrében

Az évgyűrűk klíma-növekedés kapcsolatának vizsgálatakor mindig központi problémakör a kapott értékek időbeli stabilitása. Mivel az egyes éghajlati paraméterek rekonstrukciójakor ennek a viszonyoknak a megállapítása az első lépés, rendkívül lényeges, hogy a kapcsolatról ne csak egy hosszú időszakra átlagolt értékkel rendelkezünk, de ellenőrizzük annak esetleges változásait is (Levanič et al. 2012; Prokop et al. 2016). Bár a hazai szakirodalomban nincs nagy hagyománya a klíma-növekedés kapcsolat időbeli változás vizsgálatának (Garamszegi-Kern 2014; Misi-Náfrádi 2016b; Misi-Náfrádi 2017), külföldön számos tudományos munka készült már a témában (D'Arrigo 2008; Carrer-Urbinati 2006; Pärn 2009; Koprowski 2012, 2013). Mivel az évgyűrűk szélességi fejlődése egy sokszorosán összetett rendszer eredménye, annak a külső befolyásoló tényezőkkel való kapcsolata, és e kapcsolat esetleges időbeli instabilitásának kiváltó okai sok esetben nehezen megítélhetők. A problémakör komplexitását jól mutatja, hogy bár az évgyűrűk szélessége, valamint az egyes klímaparaméterek közötti kapcsolat megváltozása általában valamilyen markáns éghajlati változás eredménye (Jacoby-D'Arrigo 1995; D'Arrigo et al. 2006; Koprowski 2013), de kiválthatja azt antropogén hatás is, például környezetszennyezés, mely gyakorlatilag felülírja az addig kialakult klíma-növekedés kapcsolatot (Pärn 2003; Kern et al. 2009c; Pärn-Mandre 2011).

Az értekezés során felhasznált 103 erdeifenyő minta több ezer évgyűrűjének szélességelemzése rendkívül nagy adathalmaz létrehozását tette lehetővé. A száz éves intervallumban elvégzett 25 éves mozgóablakos korrelációelemzés egyes időszakokban a null hipotézist alátámasztó eredménnyel zárult, de több olyan eset is volt, melyek során nem lehetett a várt eredményt kimutatni. Általánosságban elmondható, hogy a négy mintaterület adatai alapján hazánkban nincs különbség a csapadék-növekedés és a hőmérséklet-növekedés

rendszerekben leírható kapcsolat stabilitásában, mindkét esetben előfordulnak meglehetősen állandó, de jelentősen ingadozó korrelációs értékek is.

Az értekezés koncepciójának kialakításakor fontos szempont volt, hogy olyan területek erdeifenyő állományait vonjam be a vizsgálatba, melyek környezeti feltételei eltérnek egymástól, amivel a minél szélesebb spektrumú adatbázist és ismeretanyagot szerettem volna biztosítani. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy ez a törekvés sikeresnek tekinthető, hiszen több jelentős különbséget is sikerült leírni a mintaterületek klíma-növekedés kapcsolatrendszerében. Fontos azonban megjegyezni azt is, hogy az egyes éghajlati paraméterek évgyűrűnövekedést befolyásoló jellegében regisztrált változások nem feltétlenül köthetők a klimatikus körülményekhez, valamint azok időbeli alakulásához. Az évgyűrűk szélességi növekedése szempontjából alapvető fontosságú időszakok csapadék- és hőmérsékletviszonyainak változását, valamint ezek hatását a klíma-növekedés rendszerre a csúszókorrelációs eredmények, és lineáris regresszióanalízis során fogom bemutatni, mely utóbbi esetében az éghajlati értékeket mint független, a velük való korrelációt pedig mint függő változókat használtam fel.

Ahogy az a 4.3.1-es fejezetből kiderült, az elmúlt 100 évben a nyarat (JJA) és a tavaszt (MAM) súlytotta a legintenzívebb felmelegedés. Utóbbi esetében a márciusban bekövetkezett helyenként 2°C -ot is megközelítő, sőt a Bakonyalján azt meg is haladó hőmérséklet-emelkedés a négyből három mintaterületen jelentős hatással volt a korábban kialakult, bár többnyire addig sem túl stabil klíma-növekedés rendszerre. A legmarkánsabb változás a Bakonyalján történt, de az Őrségben és a Mecsekben is hasonló jellegű folyamatok mentek végbe.

31. ábra. A márciusi hőmérséklet és az évgyűrűkronológiák kapcsolatának időbeli változása a Bakonyalján. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

A Fenyőfői Ősfenyvesből származó mintaegyüttes adatai alapján elmondható, hogy az elmúlt 100 év jelentős részében a többnyire állandó márciusi hőmérséklet az évgyűrűk képződését pozitívan befolyásoló tényezőként volt jelen. Az 1960-as évek végén azonban, mikor a havi átlaghőmérséklet¹⁴ átlépte az 5,5°C-ot, először lassú, majd a 6°C-ot elérve hirtelen és drasztikus csökkenés következett be a klíma-növekedés kapcsolatban (31. ábra). A kapcsolat melegedés miatti eltűnése az RW kronológiát érintette leginkább, hiszen az a hőmérséklet-emelkedés előtt tartósan szignifikáns viszonyban volt a termikus körülményekkel, de számottevően hatott az EW és az LW adathalmazokra is. Az Őrségben meglehetősen hasonló folyamat játszódott le, de a változások időben némileg elnyújtottabban következtek be. Szalafő térségében is az 5,5°C körüli havi átlaghőmérséklet számított kritikusnak, azt elérve, a Bakonyaljával analóg módon, a korrelációs értékek csökkenése figyelhető meg, ám közel sem olyan hirtelenséggel, mint a Fenyőfői Ősfenyvesben (32. ábra). Az Őrségben magasabb, ~6,3°C-os hőmérséklet kellett ahhoz, hogy a korábban tapasztalt drasztikus visszaesés bekövetkezzen, azonban fontos megjegyezni, hogy ekkor a kapcsolat már egyik kronológia esetében sem volt szignifikáns.

32. ábra. A márciusi hőmérséklet és az évgyűrűkronológiák kapcsolatának időbeli változása az Őrségben. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.

A harmadik dunántúli mintaterületen is az imént tárgyaltakkal megegyező módon változott a klíma-növekedés kapcsolat a hőmérséklet emelkedésének hatására. A Mecsekben azonban magasabb, 6°C körüli hőmérséklet kellett a korrelációs értékek csökkenésének megindulásához, és a korábbiakban tapasztaltaktól eltérően a kapcsolati szint visszaesése

¹⁴ A fejezetben a havi átlaghőmérsékletek említésekor a 25 éves mozgóátlagban számolt értékekről lesz szó.

hirtelen váltás nélkül, folyamatosan következett be. A Nyírségben egy visszafogottabb melegedés játszódott le, melynek köszönhetően a hőmérséklet hatása az évgyűrűnövekedésre nem is változott olyan drasztikus módon, mint például a Bakonyban vagy az Őrségben. A melegedés a teljes évgyűrű szélességi ingadozására volt negatív hatással, de az ebben az esetben tapasztalható visszaesés lényegesen kisebb mértékű volt, mint a korábbi mintaterületek esetében. A keleti országrészből származó adathalmaz különlegessége, hogy a hőmérséklet-emelkedés ezen a területen pozitív hatást is kifejtett, ugyanis a magasabb hőmérséklet az EW kronológiával stabil szignifikáns kapcsolatot alakított ki. A legmarkánsabb változás a kései pászta adatainak hőmérséklettel való kapcsolatában állt be, mely már a nyugati mintaterületeken végbement átalakulást idézi. A szintén rendkívüli melegedésen átesett február egyes esetekben ellensúlyozni látszik a márciusi folyamatokat, azonban az adatok tüzetesebb vizsgálata után láthatóvá válik, hogy a február-márciusi időszak hőmérséklete és az évgyűrűkronológiák kapcsolati szintje még azokban az esetekben is csökkenő trendet mutat, ahol a februári melegedés pozitív hatást tudott gyakorolni a korrelációs szintre (Nyírség EW és RW kronológia). A helyzetet súlyosbítja, hogy a teljes téli időszakot (DJF) is melegedés jellemzi, ami a Mecsekben az EW, valamint a Nyírségben az EW és az RW kronológiák kivételével minden esetben a korrelációs értékek csökkenését vonta maga után. Ezen eredmények jelentősége elsősorban abban rejlik, hogy a téli és a kora tavaszi hőmérséklet több szempontból is alapvető fontosságú az adott évben kialakuló évgyűrűk számára, és bár a hazai erdefenyőknél egyelőre nem figyelhető meg szignifikánsan negatív kapcsolat, a korábban fennálló pozitív hatások eltűnése, valamint a hőmérsékleti értékek folyamatos emelkedése mindenképp aggodalomra okot adó tényezők. A téli felmelegedés ugyanis a kambium működésének korábbi megindulását okozza, mely a faanyag előállítását és az új hajtások megjelenésének idejét is időben korábbra helyezi (de Luis et al. 2014). Azon túl, hogy ez a vegetációs időszak hosszabbodását eredményezheti, mely pozitív hatásként értelmezhető, a melegebb körülményekhez való alkalmazkodás jelentősen megzavarja a fák természetes védekező képességét, így nagymértékben csökken ellenálló képességük a kora tavaszi fagyokkal szemben (Koprowski 2013). Intő jel, hogy Lengyelországban egy, a magyarországihoz hasonló környezeti feltételek mellett elvégzett kutatás már ki tudta mutatni a késő téli-kora tavaszi időszak hőmérséklet emelkedésének negatív hatását fenyők évgyűrűinek növekedésére (Koprowski 2013).

Az értekezés eredményeinek feldolgozása során a nyári hőmérséklet és az egyes évgyűrűkronológiák korrelációs adatai okozták a legnagyobb meglepetést. A kezdeti elképzelés ugyanis az volt, hogy a jelentős nyári hőmérséklet-emelkedés egyre erősödő negatív jelként fog

manifesztálódni az évgyűrűszélességekkel való összevetés során, ahogy az már bükkök esetében megfigyelhető volt a Bükk-hegységben (Garamszegi-Kern 2004). Ezzel szemben a nyári hónapokban egyik mintaterületen sem történt meg a hőmérséklet negatív hatásának erősödése, sőt, a stagnálás mellett egyes esetekben annak pozitív irányba való eltolódását regisztráltam (33. ábra).

33. ábra. A júliusi hőmérséklet és az évgyűrűkronológiák kapcsolata a négy mintaterületen.

A száz éves korreláció során az esetek többségében a július és az augusztus hőmérsékleti értékei érték el szignifikáns korrelációt az évgyűrűk szélességének változásával, a kapcsolat időbeli alakulása, valamint annak a hőmérséklet-emelkedéssel való összefüggése azonban megosztotta a mintaterületeket. Míg az augusztusi hőmérséklet többnyire egyfajta hullámzással jellemezhető korrelációs viszonyt alakított ki az évgyűrűnövekedéssel, mely időnként erősen negatív ($\sim r = -0,6$), majd gyengén pozitív ($\sim r = 0,15$) jelleget mutat, és nehezen magyarázható a

havi átlaghőmérséklet változásával, addig a júliusi termikus viszonyok már lényegesen erősebb kapcsolatban voltak és vannak az egyes évgyűrűpászták szélességi növekedésével (34. ábra). Hasonlóképpen több, már megfigyelt folyamathoz, a Bakonyalján és az Őrségben a hőmérséklet-emelkedésre adott válaszreakció is szinte teljes szinkronban történt, azonban jelen esetben a mecseki mintaterület is csatlakozott hozzájuk. A Nyírség kivételével, ahol nem volt megfigyelhető szignifikáns korreláció a júliusi hőmérséklettel, mindegyik mintaterületen egy kezdeti stagnálás után, az 1970-es évektől a hőmérséklet emelkedésének hatására folyamatos gyengülés tapasztalható a korrelációs értékekben, olyannyira, hogy a vizsgálati időszak végére már pozitív, sőt, a mecseki EW kronológia esetében szignifikáns kapcsolat alakult ki. Az értékek $r=0$ feletti emelkedő tendenciája a Bakonyalján és az Őrségben is megfordult a 2000-es években, annak ellenére, hogy a melegedés folyamatos volt. Ezzel szemben a Mecsekben a hőmérséklet pozitív befolyása bár lassuló ütemben, de továbbra is emelkedni látszik.

A csapadék tekintetében a nyári időszak a legfontosabb, annak azonban nem minden hónapja és nem ugyanolyan mértékben befolyásolja az évgyűrűk növekedését, ráadásul a rendelkezésre álló csapadék havi mennyisége mintaterületenként eltérő módon változott az elmúlt 100 év során, mely értelemszerűen eltérő válaszreakciókat generált. Mivel a kései pászta fejlődésében minden területen, és a teljes évgyűrű szélességének kialakulásában a négyből három mintaterületen a júliusi csapadékbevitel a legfontosabb tényező, annak mennyiségi változása, alapkoncepcióm szerint, jelentős befolyással bír a klíma-növekedés rendszerre, és az erdeifenyők növekedési dinamikájára. A Nyírség kivételével minden mintaterületen legalább 10 mm-rel csökkent a havi csapadékösszeg 25 éves átlaga (a maximumhoz képest) a vizsgálati időszak végére, azonban erre a változásra szinte minden terület máshogy reagált. A kezdeti feltevés, mely szerint a csapadék visszaesése jól érzékelhető zavart okoz a korrelációs értékekben, kizárólag a Bakonyalján igazolható, a többi mintaterületen, bár csökkenő trend látható a kapcsolati értékekben, ez nem magyarázható egyértelműen a csapadék mennyiségének változásával (34. ábra). A Fenyőfői Ősfenyvesből származó furatok kronológiai meglehetősen erős szinkronban, gyakorlatilag ugyanúgy reagáltak a csapadékviszonyok alakulására: amikor a lehulló csapadék mennyisége növekedett, annak pozitív hatása az évgyűrűnövekedésre is erősödött. Amikor viszont szárazabb periódus következett, a korrelációs értékek csökkenő tendenciával válaszoltak. A folyamat következtében a vizsgálati idő végére a csapadék mennyisége és az RW kronológia közötti szignifikánsan pozitív kapcsolat megszűnt, és az LW pásztával is jelentősen csökkent. Ezzel szemben a Mecsekben és az Őrségben a korrelációs értékek csökkenése inkább a nedvesebb időszakokhoz köthető, míg a Nyírségben lényeges változás tulajdonképpen nem történt sem a csapadék mennyiségében, sem a korrelációs

értékekben. Az egymástól jelentősen eltérő válaszreakció a dunántúli mintaterületeken minden bizonnyal a talajtani különbségekre vezethető vissza. Bár az erdeifenyő rendkívül jól alkalmazkodik az eltérő környezeti viszonyokhoz (Vitas-Erlickyté 2008; Xenakis et al. 2012), a bakonyaljai mintaterületet fedő homoktalaj normál körülmények között is nehezebben tolerálható feltételrendszert jelent, mint a lényegesen jobb vízháztartási tulajdonságokkal jellemezhető erdőtalaj, mely az Őrség és a Mecsek állományai számára a táptalajt jelenti. Emiatt a plusz júliusi csapadékbevétel a Bakonyalján a környezeti feltételek javulását jenti, mely pozitívan hat az évgyűrűk növekedésére, az Őrségben és a Mecsekben pedig fordított módon negatív reakciót vált ki, melynek egyik magyarázata az addig megszokotthoz képest túlzott mennyiségű csapadék növekedést hátráltató hatása lehet (Fritts 1976).

34. ábra. A júliusi csapadék és az évgyűrűkronológiák kapcsolata a négy mintaterületen.

Júniusban és augusztusban a szignifikancia szint feletti sávban a csapadék mennyiségével összefüggésbe hozható, lényeges változások nem történtek a korrelációs értékekben. A két hónap viszonylagos állandóságának köszönhetően a teljes nyári időszakban egy többé-kevésbé stabil, a csapadékbevitel változásai által csak kis mértékben befolyásolt korrelációs séma rajzolódik ki.

Az előzőekben taglalt eredményekhez igazodva a területi ariditási indexek és az évgyűrűkronológiák kapcsolata drasztikusan nem változott az elmúlt 100 év során. A szárazság és az évgyűrűnövekedés tekintetében legfontosabb időszakban, nyáron, a Bakonyalján az ariditási értékek meredek növekedése ellenére kiegyensúlyozott kapcsolat állt és áll fent, az Őrségben egy lassú, negatív irányba történő erősödés figyelhető meg, míg a Mecsekben a szárazság növekedésével párhuzamosan a kapcsolati szint gyengülése írható le. A Nyírség e tekintetben is különbözik egy kicsit a többi mintaterülettől, ugyanis ott az ariditástól látszólag függetlenül változó és rendkívül instabil jel észlelhető az elmúlt 100 év során.

A disszertációban megvizsgált négy mintaterület erdeifenyő állományainak elemzése alapján kijelenthető tehát, hogy az éghajlati viszonyok átalakulása az elmúlt 100 év során mérhető hatást gyakorolt a korábban kialakult klíma-növekedés kapcsolatra. Ez az eredmény azért is rendkívül fontos, mert a hazai és a külföldi dendroklimatológiai módszertanban egyaránt bevett szokás, hogy hosszú időszakok (pl. 80-100 év) átlagadatai alapján jellemzik az egyes fajok klíma-növekedés kapcsolatát. Jelen értekezés is rámutat azonban arra, hogy a klímaváltozásnak köszönhetően szignifikáns különbség lehet az évgyűrűk és a klímaparaméterek viszonyában az 1950-60-as évek előtt és után, mely akár a korábbi eredmények újragondolását is indukálhatja, de a későbbi kutatások során mindenképp számolni kell vele.

Jelenleg nehéz megbecsülni, hogy hosszú távon milyen következményei lesznek/lehetnek a bemutatott változásoknak a hazai erdeifenyők fejlődésére. Külföldi tanulmányok alapján, melyek az erdeifenyők növekedésének dinamikáját valamint a klíma-növekedés viszonyának jövőbeli alakulását vizsgálták megállapítható, hogy a kontinens északi részén a felmelegedés pozitív hatással lesz az erdeifenyők növekedési rátájára, valamint az is, hogy Európa déli részén hosszú távon jelentős visszaesés prognosztizálható a fejlődésben (Reich-Oleksyn 2008; Bauwe et al. 2015). A fennmaradó középső részen egy nagyon törekeny egyensúly állhat be, azonban az sem mindenhol. Bauwe és munkatársai (2015) szerint azokon a területeken maradhat stabil az erdeifenyők növekedése ahol a téli hőmérséklet-emelkedés pozitív hatásai ellensúlyozni tudják a nyári aszályos időszakok negatív befolyását. Sajnálatos tény, hogy bár a négy vizsgált mintaterület mindegyikén meredeken emelkedett a téli

hőmérséklet az elmúlt 30-40 évben, ez csak a Nyírség EW és RW kronológiáiban tudott erősödő pozitív kapcsolatként megjelenni. Ha elfogadjuk tehát Bauwe és munkatársainak megállapítását, hazánkban hosszú távon az erdefenyő állomány növekedésének visszaesésére kell számítani.

Bár a korrelációanalízis számos lényeges ismeretanyagot biztosít a fák klíma-növekedés rendszeréről, valamint annak (például a klímaváltozással összefüggésbe hozható) változásairól, az egyes évgyűrűk, azok jellegének, karakterének vizsgálata közvetlenebb információkat adhat a fákra ható külső körülmények módosulásának évgyűrűnővekedésre gyakorolt hatásáról. Azonban, ahogy jelen értekezés eredményei is mutatják, az egyes évgyűrűkarakterek vizsgálata térben meglehetősen korlátozott lehet. Annak ellenére, hogy például az éven belüli sejtsűrűség ingadozás egy jól ismert és rendszeresen kutatott jelenség a mediterrán térségben (Campelo et al. 2006; de Luis et al. 2011; De Micco et al. 2013, 2016; Battipaglia et al. 2016), és mérsékelt erdőkben sem számít ritkaságnak (Vaganov et al. 2006; Panayotov et al. 2013; Battipaglia et al. 2016), a hazai mintaterületek ezen speciális évgyűrűkarakter megjelenésében, számában és a klímaviszonyokhoz való kapcsolatában is jelentősen eltérnek egymástól. Éppen ezért nem csak időbeli gyakoriság-különbségekről, de megfelelően definiálható éghajlati kapcsolatról is nehéz beszélni a magyarországi erdefenyőkben található IADF-ek esetében. Az eredmények azért érdekesek, mert mérsékelt erdőkben, ahol nincs kiemelkedően száraz időszak, a fák gyakran a tracheidák sejtfalvastagságának csökkentésével és azok sejtméretének növelésével reagálnak a magas nyári hőmérsékletre, melynek funkciója a magasabb hatásfokú vízzállítási képesség biztosítása (Vaganov et al. 2006). Ennek ellenére sem a Bakonyalján, sem pedig az Őrségben nem sikerült a nyári hőmérsékleti viszonyokhoz kötni a sejtsűrűség ingadozások megjelenését, pedig mindkét mintaterület termikus viszonyai jelentősen emelkedtek az elmúlt 100 év során (1. melléklet). Ez abból a szempontból is érdekes, hogy az IADF-ek szinte minden esetben L-gyűrűként jelentek meg, tehát a kései pászta növekedési ciklusában képződtek, ami meglehetősen egyértelmű jel a kialakulásukért felelős környezeti feltétel vagy feltételek időbeli jelenlétére. A későbbiekben érdemes lenne további figyelmet fordítani erre az igazán különleges évgyűrűkarakterre: a növekedési időszak során történő folyamatos, fix időközönként történő monitorozással (pl. 3 hét) jelentősen növelhető lenne a rendelkezésre álló ismeretanyag a hazai erdefenyő állományokban található éven belüli sejtsűrűség ingadozást kialakító mechanizmusról.

A szokatlanul vékony évgyűrűk megjelenése jóval egységesebb képet mutat a négy mintaterületen. Bár a korrelációanalízis nem tár fel egy egységes sémát, mely az összes mintaterületen érvényes lenne, összességében elmondható, hogy a nyári csapadék mennyisége

a vékony évgűrű képződés elsőszámú stresszfactora, de az esetek többségében az évgűrűnövekedést megelőző nyár hőmérsékleti viszonyai is rendkívül fontosak. A vékony évgűrűk gyakoriságának időbeli változása jól alátámasztja ezt a tézist, ugyanis az elmúlt 25-30 évben, a hőmérséklet ugrásszerű változásával gyakorlatilag egyidőben, a vékony évgűrűk megjelenése is jelentősen megszaporodott: 1985-öt követően drasztikusan emelkedett a számottevő növekedési visszaeséssel jellemezhető évgűrűk száma és időbeli gyakorisága is.

35. ábra. A vékony évgűrűk gyakorisági értékeinek kapcsolata az ariditási indexekkel a négy mintaterületen.

Az adathalmaz csúcspontjai, úgy, mint 1992, 1993, 2003, 2007, kiválóan illeszkednek a jelentős magyarországi (alföldi) aszályokhoz (Pálfai 2011), és az egyes mintaterületek által számolt nyári aszályindexéhez (35. ábra). A mintából néhány időszak kilóg, egyes vékony évgűrű megjelenések nem magyarázhatók a szárazsággal, és olyan is előfordult, hogy aszályos évben nem képződött vékony évgűrű. Utóbbi a kronológiák első felében a legjellemzőbb, mely alapján az erdeifenyők fiatal korokban jelentkező visszafogottabb vékony évgűrű képződési hajlamára következtethetünk. Előbbi kategóriába tartozik az egyik legfigyelemreméltóbb NR ciklus, mely az 1985 előtti periódus legjelentősebb marker időszaka. Az 1960-as évek első felében a Bakonyalján 4, a Mecsekben és az Őrségben 2-2 éven át képződött a normálisnál vékonyabb évgűrű, úgy, hogy az adott években egyik területen sem volt aszály. A jelenség háttérében téli események vannak, melyek bár ritkábban, de szintén okozhatnak visszafogottabb növekedést a tenyészidőszakban (Schweingruber 1996). Irodalmi forrásokból tudható (Kósa 1963), hogy 1962 novemberében rendkívül kiterjedt, hónymás okozta töréskár súlytotta a Fenyőfői Ősfenyvest, melynek eredményeként a fiatal állomány 10-20%-a, és a középkorú fenyők 30%-a szenvedett el valamilyen töréskárt (törzs, korona vagy csúcs). Egy ilyen esemény komoly megrázkódtatást jelent a fának, ugyanis az elvesztett lobkorona miatt lényegesen kisebb mennyiségű energiát képesek a fotoszintézis által hasznosítani, de a nyílt törések a rovarok számára is ideális környezetet jelentenek a táplálkozásra, mely szintén visszafogottabb növekedést okozhat (Koprowski-Duncker 2012). A fenyvesnek gyakorlatilag esélye sem volt a felépülésre, ugyanis 1963-ban újabb csapás érte, ezúttal zúzmara formájában, mely szintén számottevő töréskárral járt (Papp 1966). Minden bizonnyal ez a két esemény, valamint a '60-as évek első felének rendkívül hideg telei okozták az egészen 1964-ig tartó vékony évgűrűképződést a Bakonyalján. Bár az Őrségből és a Mecsekből nem rendelkezem ilyen írott forrásokkal, valószínűsíthető, hogy az azokon a területeken is jelentkező rideg telek, és az azzal járó, a fenyőfőihez hasonló események idézték elő az évgűrűnövekedés visszaesését.

6.3. Az eredmények térbeli kiterjeszthetőségének vizsgálata

Mivel az évgűrűk képződését jelentős mértékben befolyásolják a fákat érő külső (pl. klimatikus) tényezők, természetes jelenség, hogy az évgűrűszélességek (vagy más évgűrűparaméterek) felhasználásával elkészített kronológiák térbeli érvényessége korlátozott lesz. A korrelációs értékek csökkenése érintheti a fajon belül vagy fajok közt felállított idősorokat (Frank-Esper 2004), valamint értelemszerűen a klímparaméterekkel való

kapcsolatot is, melynek például egy-egy klímarekonstrukció térbeli kiterjeszhetőségénél van jelentősége (Levanič et al. 2012; Kern et al. 2013; Levanič et al. 2015).

Jelen értekezésben arra voltam kíváncsi, hogy az egyes területi évgyűrűkronológiák térben meddig terjeszthetők ki az éghajlati paramétereket figyelembe véve, hogyan korrelálnak egymással az EW, LW és RW idősorok, valamint, hogy a Bakonyalján, az Őrségben, a Mecsekben és a Nyírségben tapasztalt vékony évgyűrű képződési időszakokban hogyan reagáltak az ország más részein lévő erdeifenyő állományok a szélsőséges környezeti feltételekre.

36. ábra. A Bakonyalja (zöld), az Őrség (narancs), a Mecsek (sárga) és a Nyírség (kék) területi kronológiáinak standardizált RW (A), EW (B) és LW (C) indexgörbéi.

A területi kronológiák egymással való kapcsolatát vizsgálva markáns dunántúli dominancia rajzolódik ki (3. táblázat). A Bakonyalja, az Őrség és a Mecsek EW, LW és RW idősorpárjai is $r=0,5$ feletti korrelációt mutatnak egymással. Érdekesség, hogy attól függetlenül, hogy a Fenyőfői Ősfenyveshez az őrségi mintaterület van a legközelebb, a teljes évgyűrűszélesség váltakozása a Kővágószőlős környékéről származó furatokkal érte el a legmagasabb korrelációt ($r=0,64$), mely egyébként a legmagasabb kapcsolati fok az összes

kronológiapárt figyelembe véve. Ahogy az az adatelemzés több fázisában is megmutatkozott már, a Nyírségből származó minták növekedési jellemzői némileg kilógnak a dunántúli sémából (36. ábra), azonban fontos megjegyezni, hogy az az adatsor egy telepített állomány egyedeire épül, melyek növekedése és a környezeti viszonyokra adott válasza eltérhet a természetes erdőkétől.

3. táblázat. A területi kronológiák korrelációs mátrixa

		Bakonyalja			Őrség			Nyírség			Mecsek		
		EW	LW	RW	EW	LW	RW	EW	LW	RW	EW	LW	RW
Bakonyalja	EW	1											
	LW	0,47	1										
	RW	0,83	0,86	1									
Őrség	EW	0,59	0,22	0,45	1								
	LW	0,31	0,60	0,54	0,48	1							
	RW	0,51	0,47	0,58	0,84	0,84	1						
Nyírség	EW	0,25	0,10	0,23	0,34	0,08	0,26	1					
	LW	0,09	0,44	0,32	0,06	0,40	0,26	0,31	1				
	RW	0,16	0,33	0,32	0,19	0,32	0,31	0,76	0,65	1			
Mecsek	EW	0,53	0,19	0,41	0,52	0,21	0,40	0,07	0,09	0,03	1		
	LW	0,43	0,60	0,61	0,16	0,52	0,38	0,08	0,39	0,24	0,31	1	
	RW	0,56	0,53	0,64	0,40	0,48	0,50	0,13	0,36	0,24	0,76	0,80	1

A CRU TS 3.23 0.5°x0.5° (Harris-Jones 2015) grid adatbázisának segítségével a február-március időszak átlaghőmérsékletének és a június-július-augusztus időszak csapadékösszegének kapcsolatát vizsgáltam az egyes mintaterületek kronológiáival. Előbbi esetben az EW és az RW idősorok adatait, utóbbi esetben pedig az LW és az RW idősorok adatait használtam fel. A legnagyobb térbeli korreláció a korai pászta szélességértékei és a hőmérséklet között figyelhető meg (4. melléklet). A kontinens jelentős részét lefedő kapcsolati hálót a hazánkban is megfigyelt $r=0,2$ és $r=0,3$ közötti, valamint az az alatti korreláció jellemzi. Két esetben, az Őrség és a Mecsek EW adatsoraiban írható le nagyobb területet lefedő, $r=0,4$ -et meghaladó korreláció a késő téli-kora tavaszi időszak hőmérsékletével. Előbbi Lengyelországban, utóbbi pedig Németország középső területén jelentkezik. A teljes évgyűrű szélességértékeinek ugyanezen időszakokkal való összevetése a térbeli kiterjedés szűkülését és a korrelációs értékek csökkenését hozza (5. melléklet). A nagy térbeli lefedettség jelentős méretű

kapcsolati hálóról tanúskodik, az alacsony korreláció miatt azonban egy rekonstrukció esetében az eredmények csak erős fenntartásokkal, vagy még úgy sem lennének kiterjeszthetők.

37. ábra. A négy mintaterület teljes évgyűrűszélesség kronológiáinak térbeli kapcsolata a nyári (JJA) csapadékkal.

Ezzel szemben (nem meglepő módon), a nyári csapadék jóval magasabb korrelációs értékekkel és lényegesen kisebb területen áll szignifikáns kapcsolatban az LW és az RW kronológiákkal (37. ábra). A legmagasabb korrelációk természetesen a mintaterületek közelében jelentkeznek, de a bakonyaljai és a mecseki LW kronológiák gyakorlatilag az egész Kárpát-medencét $r=0,4$ feletti értékekkel fedik le (6. melléklet). Érdekes, hogy a Bakonyaljaihoz sok tekintetben rendkívül hasonló Őrségi idősor lényegesen kisebb területen tud

viszonylag magas, $r=0,5$ feletti kapcsolati szintet elérni. Az erős korrelációs értékekkel jellemezhető érvényességi terület relatíve nagy mérete alapján a mecseki és a bakonyaljai kronológiák esetében jó esély van az országhatáron túlról származó idősorokkal való összevetésre, és egy esetleges későbbi rekonstrukció térbeli kiterjesztésére. Fontos azonban megjegyezni, hogy erre a térbeli korrelációs kapcsolatra is jelentős hatással vannak a vizsgált időszakon belül bekövetkező éghajlati változások, melyek adott esetben teljesen meg tudják változtatni egy-egy adatsor területi érvényességét. Jó példa erre a bakonyaljai teljes évgyűrűszélesség kronológia, mely esetében az elmúlt 100 évet két különálló időtartamra bontva markáns különbségeket tapasztalhatunk a térbeli kiterjeszthetőség mértékében (38. ábra).

38. ábra. A Bakonyaljáról származó RW kronológia térbeli kiterjeszthetőségének változása nyári (JJA) csapadék alapján az elmúlt 100 év során.

A vékony évgyűrűk gyakorisági adatai alapján két olyan évet választottam ki az eredmények térbeli kiterjeszthetőségnek vizsgálatára, melyekben mind a négy kronológia alapján jelentősen visszaesett az évgyűrűnövekedés üteme. Az Erdőleltárból származó furatokon elvégzett elemzés eredményei jól mutatják, hogy a négy mintaterületen regisztrált vékony évgyűrű jelenlét országos tendenciákat mutat. 1993¹⁵ és 2003 is rendkívül aszályos év

¹⁵ Az 1993-as év rendkívül domináns növekedési visszaesését az is elősegíthette, hogy az azt megelőző, 1992-es esztendő is komoly aszály súlytotta (Pálfai 2011).

volt az Alföldön (Pálfi 2011), aminek köszönhetően, ahogy az a 39. ábrán is látható, az ország számottevő részén jelentősen elmaradt az évgűrűk szélessége az átlagostól. 1993-ban még több terület volt, ahonnan olyan furat származott, melyben nem volt megfigyelhető a visszafogottabb növekedési ütem, ám ezek száma 2003-ra nagymértékben csökkent (7. melléklet).

39. ábra. Kiugró értékek nélküli évgűrűnövekedési anomáliák két aszályos évben az Erdőleltárból származó furatok szélességadatai alapján.

Bár a kiugró értékek torzítják valamelyest a képet (7. melléklet), megállapítható, hogy a magyarországi erdőfenyő állományok térbeli elhelyezkedésükre való tekintet nélkül erőteljes növekménycsökkenéssel reagálnak az aszályos időszakokra. Ez alól mindössze két olyan terület látszik kivételt képezni, melyeken sem 1993-ban sem pedig 2003-ban nem tapasztaltam negatív növekedési anomáliát. A kiugró értékek nélküli, regionális átlagolással készített

térképek azonban jól kiegyenlítik az egyes kiugró értékek miatti torzulásokat, és megmutatják a nagyobb területi trendeket. Segítségükkel láthatóvá válik, hogy az 1993-as évgyűrűnövekedés, az országban egyedülként Pest megyében jellemezhető pozitív anomáliaértékekkel, Somogy megye központi részén csak egy furatban volt tapasztalható a vártnál vastagabb évgyűrű, ami nem sok ugyan, de elegendő az eredmények módosulásához. 2003-ban már lényegesen jelentősebb volt az átlagos évgyűrűszélesség csökkenés, melynek következtében az átlagolt regionális anomália értékek mindenhol negatív tartományba csúsztak. A Pest megye - Somogy megye tengely továbbra is kitűnik az országos átlagból, a két terület jóval visszafogottabb évgyűrűnövekedés csökkenéssel reagált az erősebb aszályra (Harris-Jones 2015). Az eredmények azért is érdekesek, mert az ország középső része a CRU TS 3.23 scPDSI adatbázisa alapján (Harris-Jones 2015) 1993-ban és 2003-ban is a szárazsággal legerősebben érintett régió volt, csakúgy, mint a Duna-Tisza köze déli része, ahol ennek megfelelően jelentősen visszaesett az évgyűrűk szélessége mindkét évben. A Pest megyei (és kisebb mértékben a Somogy megyei) erdeifenyők tehát minden bizonnyal lényegesen kisebb aszályérzékenységgel jellemezhetők, ezen jelenség okainak feltárására azonban további vizsgálatokra lenne szükség. Sajnálatos tény, hogy a szárazsággal leginkább súlytott országrészből nem áll rendelkezésre megfelelő mennyiségű erdeifenyő minta, így a későbbiekben érdemes lenne más fajok bevonásával további elemzéseket végezni az alföldi erdők aszályérzékenysége, és a száraz időszakokra adott válaszreakcióiknak megállapítása érdekében.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az évgyűrűk szélességváltozásainak klimatikus függése jól ismert tény és széles körben alkalmazott eszköz a paleo- és a recens klimatológiában is. A fák évi növekménye és az éghajlati adatok együttes elemzése lehetőséget biztosít az évgyűrűnövekedés fő külső mechanizmusainak megértésére, ökológiai változások vizsgálatára és különböző klímparaméterek rekonstrukciójára is. A dendroklimatológia, mely a fát érő éghajlati hatások évgyűrűnövekedést befolyásoló szerepével foglalkozik, a mai évgyűrűkutatás húzóága.

Jelen értekezésben azokra a kérdésekre kerestem a választ, hogy (1) mely éghajlati paraméterek befolyásolják leginkább a magyarországi erdeifenyő állományok évgyűrűnövekedését, és hogy (2) ezen paraméterek hogyan változtak meg az elmúlt 100 év során, valamint, hogy ez a változás milyen hatással volt a fenyők klíma-növekedés rendszerére. E mellett fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy (3) az olyan speciális évgyűrűkarakterek,

melyek a szakirodalom szerint szélsőséges külső körülményekhez köthetők, megjelennek-e a hazai erdeifenyőkben, és ha igen, (4) gyakoriságuk hogyan változott az elmúlt 100 évben.

Négy mintaterületről összesen 103 erdeifenyő évgyűrűmintázatát vizsgáltam meg. Az elvégzett elemzések eredményei alapján elmondható, hogy Magyarországon a nyári, azon belül is a júliusi csapadék az erdeifenyők évgyűrűnövekedésének fő limitáló tényezője. E mellett jelentős hatása van a február-márciusi időszak, valamint a nyár hőmérsékletének is. A két klímaparaméter természetesen nyáron egymás ellen hat, a csapadék pozitív irányban befolyásolja az évgyűrűk fejlődését, ezzel elsődleges szerepet játszva azok fejlődésében, a hőmérséklet pedig elsősorban a hasznosítható csapadék mennyiségének szabályozásával negatív hatást gyakorol a kialakuló évgyűrű szélességére. Ezzel szemben a késő téli-kora tavaszi időszakban a hőmérséklet pozitív kapcsolatban áll az évgyűrűnövekedéssel, melynek okai a vegetációs időszak beindulásához szükséges termális feltételek előteremtésében keresendők.

Az elmúlt 100 év klimatikus átalakulásának hatását mozgóablakos Pearson korrelációval vizsgáltam. Bár a mintaterületek között több különbség is mutatkozott, összességében elmondható, hogy a teljes vizsgálati időszak alapján megállapított klíma-növekedés kapcsolatok meglehetősen instabilak, és nagymértékű változásokon mentek keresztül az elmúlt évszázadban. Az eredmények alapján elmondható, hogy a növekedés szempontjából fontos időszakok közül többen is jelentősen esett, vagy egyes esetekben teljesen meg is szűnt a kapcsolat az évgyűrűk szélességi értékei és az egyes éghajlati paraméterek között. Fontos azonban kiemelni, hogy bár a négy mintaterületen számos átalakulás történt az erdeifenyők klíma-növekedés kapcsolatában, ezek sok esetben nem voltak egyértelműen a felmelegedéshez, vagy a csapadékviszonyok változásához köthetők.

A disszertációban két természetestől eltérő évgyűrűkaraktert, az éven belüli sejtsűrűség ingadozást és a szokatlanul vékony évgyűrűket vizsgáltam. Bár mindkettő a fákat erő extrém külső körülményekhez köthető, közülük csak az egyiket sikerült egyértelműen klimatikus eseményekhez kapcsolni. Noha az éven belüli sejtsűrűség ingadozás nem a mérsékelt erdőkben a legjellemzőbb és leginkább kutatott, négy mintaterületem közül kettőben, a Bakonyalján és az Őrségben jelentős mennyiségben fordult elő. Magas számuk azonban meglehetősen diverz gyakorisági eloszlással párosult, melynek köszönhetően markáns éghajlati jelet nem sikerült azonosítani megjelenésükben. Más volt a helyzet a vékony évgyűrűk esetében, melyek az esetek nagy százalékában a nyári csapadékviszonyokhoz voltak köthetők. Mennyiségi és időbeli eloszlásuk is jól igazodott az elmúlt néhány évtized nagyobb aszályaihoz. Érdekes, hogy

nem csak a nyári szárazságot, de egy esetben téli szélsőséges eseményeket is sikerült azonosítani az évgyűrűmintázatból.

A négy erdeifenyő állomány komplex dendroklimatológiai elemzése után kijelenthető, hogy a faj magas alkalmazkodó képessége ellenére a jelenleg zajló felmelegedés a jövőben komoly kihívások elé állíthatja a magyarországi erdeifenyveseket. Az eredmények alapján ma még nem jelenthető ki minden kétséget kizáróan, hogy a klímaváltozás hatására a fenyők növekménye csökkenni fog, ahogy az sem, hogy ez az ország minden részét érinteni fogja, az viszont előre jelezhető, hogy a jég egyre vékonyabb lesz, és komoly erőfeszítéseket kell tennünk annak érdekében, hogy ne szakadjon be.

8. SUMMARY

Significant relationship between climate and tree-growth is a well-known and widely used tool for both paleo and recent climate studies to describe climatic processes, to make climate reconstruction or to analyse ecological alterations related to climate change.

In the present dissertation I aimed to answer the following four questions with complex dendroclimatological analyses of Hungarian Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands: (1) which climate parameters affect tree-ring width variation, (2) how the influence of changing climatic conditions has evolved over the last 100 years and has modified the climate-growth relationship, (3) did special tree-ring characters (related to extreme events principally) appear in the Hungarian Scots pine stands, and if so (4) how their frequency has changed over the last 100 years.

In total 103 individuals were cored and investigated from four sample areas (Bakonyalja, Őrség, Mecsek, Nyírség). The climate-growth relationship observed in the tree-ring indices of our study sites is typical of areas of low elevation-moderate climate with a positive dominance of summer precipitation and a negative maximum correspondence with summer temperature. Our results indicate the amount of July precipitation is the most important limiting factor in tree-ring growth over the entire study period. In August and especially in June rainfall also correlates significantly, but with lower weight. Temperature, with its negative effect on tree-ring formation, dominates in summer. It has a particularly important role in tree-ring width variation, in particular due to its influence on the usable amount of precipitation. In addition to summer, a significant relationship between temperature and tree-ring widths can be found in February and March, but in case positive. This influence in the late winter-early spring

period can most probably be explained by the essential role of thermal conditions in the onset of tree-ring formation.

For the investigation of the effect of changing climatic conditions on tree-ring growth during the study period, 25-year moving window correlations of climate and tree-ring width data were computed. While I observed differences in the climate response between the study sites, in a whole it can be said that the correlations values which were calculated over the entire study period are temporarily instable and have changed significantly in the last century. According to the results of moving window correlations, the relationship between tree-ring width variation and climate data have dramatically decreased or even totally vanished. It is important to highlight, however, that considerable alterations have happened in the climate-growth relationship of Scots pine stands, in many cases I was not able to link them to temperature or precipitation patterns.

As an additional source of information, two special tree-ring characters were investigated: intra-annual density fluctuations (IADF) and exceptionally narrow rings (NR). While IADFs are not the most typical in the temperate forest, in the site Bakonyalja and in the site Órség I found notable amount of them. In spite of their high number, however, their temporal distribution was diverse and no clear climate signal was detected. In contrast, appearance of NRs could be unequivocally connected to the amount of summer precipitation. Their occurrence, distribution and frequency fitted well to the drought pattern of the last few decades. Beyond summer aridity, I was able to identify extreme winter events using narrow rings as well.

To sum up the results of the dendroclimatological analysis of the four study sites, it can be said that even though there is no unquestionable sign of future growth decline related to climate change, it is quite sure that the balance will be fragile and will require a lot of efforts to keep it up.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szerencsésnek tartom magam, mert most sok emberhez szólhatok, megköszönve ilyen vagy olyan segítségüket.

A sort természetesen a Családdal nyitom. A Családdal, amiben felnőttem, szüleimmel és testvéreimmel, akik minden döntésemben támogattak és töretlenül hittek a céljaimban, és a Családdal, amiben élek, feleségemmel és kisfiammal, akik biztatása és motiváló ereje nélkül ez a munka bizonyosan befejezetlen maradt volna. Köszönöm mindnyájatoknak!

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Náfrádi Katalinnak, hogy megismerhettem ezt a csodálatos tudományterületet, és hogy annyi éven keresztül kitartott mellettem. Tanácsainak, ötleteinek hatása ott van minden sorban, amit papírra vettem. Hiszem, hogy a közös munka mindkettőnk számára gyümölcsöző volt, hogy érdemes volt belevágni és végig kitartani mellette.

Köszönöm tanszékvezetőmnek DSc habil Sümegi Pálnak a támogatását, bizalmát és bátorítását, ha épp arra volt szükség. Tudom, számos csatát kellett megvívnia miattam, igyekezni fogok megszolgálni.

Különösen hálás vagyok Dr. Kern Zoltánnak, akitől rengeteget tanultam az elmúlt évek alatt, és akinek szakmai segítsége, útmutatásai nélkül, bár sablonosnak hangzik, de ez a disszertáció egészen biztos nem készülhetett volna el. Köszönöm továbbá, hogy bármikor fordulhattam hozzá, ha valamiben elakadtam, vagy ha valamilyen technikai felszerelésre volt szükségem a munka során.

Köszönettel tartozom Prof. Katarina Čufarnak és Dr. Marcin Koprowskinak, akik munkájukkal nagyban inspiráltak, és formálták azt a tudományos ösvényt, melyen végül elindultam.

Köszönöm a Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal Erdőleltározási, Erdővédelmi és Szabályozási Osztályának, hogy biztosították számomra erdeifenyő mintáikat.

Köszönöm a Földtani és Őslénytani Tanszék minden dolgozójának és PhD hallgatójának, hogy egy kiváló csapatban tölthettem el életem egyik legszebb időszakát. Köszönöm az állandó jó hangulatot, a közös kajálásokat és a légkört, amit nehéz lesz pótolni.

Végül, de cseppet sem utolsó sorban, köszönöm barátaimnak, hogy mindig ott voltak, ha úgy éreztem egy kis lazításra van szükségem. Remélem, megbocsájtjátok nekem, hogy nem emlétek mindenkit név szerint.

10. IRODALOMJEGYZÉK

- ARGYROUS G (2005) Statistics for Research with a guide to SPSS. Sage Publications, 608 p.
- ASHERIN LA, MATA SA (2001) Basic Tree-Ring Sample Preparation Techniques for Aging Aspen. USDA Forest Service Proceedings RMRS–P–18, 347–351.
- BABOS K (1983) Néhány fafaj évgyűrűszélességeinek összehasonlítása a napfolttevékenység ciklusával. Botanikai Közlemények 70/1-2: 83-90.
- BABOS K (1984) A csertölgy és néhány más fafaj évgyűrűszélesség és az éves csapadék összefüggés-vizsgálata. Botanikai Közlemények 71: 123-132.
- BABOS K (1986) Az évgyűrűszélesség és a csapadék összefüggés-vizsgálata egy további fafajnál (fehér akác–*Robinia pseudoacacia* L.). Botanikai Közlemények 73/1-2: 131-137.
- BAILLIE MGL, PILCHER JR (1973) A simple crossdating program for tree-ring research. Tree-Ring Bulletin, 33: 7–14.
- BALOGH CS (2013) Alsó-Örségi erdőtervezési körzet körzeti erdőterve. Szombathely, 97 p.
- BATTIPAGLIA G, CAMPELO F, VIEIRA J, GRABNER M, DE MICCO V, NABAIS C, CHERUBINI P, CARRER M, BRÄUNING A, ČUFAR K, DI FILIPPO A, GARCÍA-GONZÁLEZ I, KOPROWSKI M, KLISZ M, KIRDYANOV AV, ZAFIROV N, DE LUIS M (2016) Structure and Function of Intra-Annual Density Fluctuations: Mind the Gaps. Front Plant Sci 7: 595. doi: 10.3389/fpls.2016.00595
- BAUCH J, ECKSTEIN D, BRAUNER G (1978) Dendrochronologische Untersuchungen an Eichenholztafeln von Rubens-Gemälden. Jahrb Berlin Museen 20: 209–221. doi: 10.2307/4125747
- BAUWE A, JURASINSKI G, SCHARNWEBER T, SCHRÖDER C, LENNARTZ B (2015) Impact of climate change on tree-ring growth of Scots pine, common beech and pedunculate oak in northeastern Germany. iForest 9: 1-11. doi: 10.3832/ifor1421-008
- BIJAK S (2010) Tree-ring chronology of silver fir and its dependence on climate of the Kaszubskie Lakeland (Northern Poland). Geochronometria 35: 91–94. doi:10.2478/v10003-010-0001-9
- BIONDI F, WAIKUL K (2004) DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Comput Geosci 30: 303-311. doi:10.1016/j.cageo.2003.11.004
- BLANKA V, SIPOS GY, KISS T (2006) Kanyarulatképződés tér- és időbeli változása a Maros magyarországi szakaszán. In: KERTÉSZ Á, DÖVÉNYI Z, KOCSIS K (Eds.): III. Magyar Földrajzi Konferencia: absztrakt kötet + CD-ROM, 238 p.

- BODIG J, JAYNE B (1982) *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinold, New York, 712 p.
- BORHIDI A (2003) *Magyarország növénytársulásai*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 579 p.
- BOZÓ L (Ed) (2010) *Környezeti jövőkép – Környezet- és klímabizottság*. MTA, 64 p.
- BÄRNING A, DE RIDDER M, ZAFIROV N, GARCÍA-GONZÁLEZ I, DIMITROV DP, GÄRTNER H (2016) Tree-ring features: indicators of extreme event impacts. *IAWA Journal* 37/2: 206-231. doi: 10.1163/22941932-20160131
- BRIFFA KR, JONES PD, BARTHOLIN TS, ECKSTEIN D, SCHWEINGRUBER FH, KARLÉN W, ZETTERBERG P, ERONEN M (1992) Fennoscandinavian summers from AD 500: Temperature changes on short and long timescales. *Clim Dynam* 7: 111-119. doi:10.1007/BF00211153
- BRIFFA KR, SCHWEINGRUBER FH, JONES PD, OSBORN TJ, HARRIS IC, SHIYATOV SG, VAGANOV EA, GRUDD H (1998) Trees tell of the past climates: but are they speaking less clearly today? *Philos T Roy Soc B* 353: 65-73. doi: 10.1098/rstb.1998.0191
- CAMPELO F, NABAIS C, FREITAS H, GUTIÉRREZ E (2006) Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Ann For Sci* 64: 229-238. doi: 10.1051/forest:2006107
- CARRER M, URBINATI C (2006) Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytol* 170: 861-872. doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01703.x
- CHURKOVA OV, EUGSTER W, ZIELIS S, CHERUBINI P, ETZOLD S, SAURER M, SIEGWOLF R, BUCHMANN N (2014) Increasing relevance of spring temperatures for Norway spruce trees in Davos, Switzerland, after the 1950s. *Trees – Struct Funct* 28: 183-191. doi: 10.1007/s00468-013-0941-6
- COOK ER (1985) *A Time Series Analysis Approach to Tree-ring Standardization*. PhD értekezés, The University of Arizona, Tucson, 171 p.
- COOK ER, BRIFFA KR, MEKO DM, GRAYBILL DA, FUNKHOUSER G (1995) The 'segment length curse' in long tree chronology development for paleoclimatic studies. *Holocene* 5/2: 229-237. doi: 10.1177/095968369500500211
- COOK ER, BRIFFA KR, SHIYATOV S, MAZEPA V (1990) Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In: COOK ER, KAIRIUKSTIS LA (Eds.): *Methods of dendrochronology: applications in environmental science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 104-123 p.
- COOK ER, KRUSIC PJ (2006) ARSTAN4.1b_XP. <http://www.ldeo.columbia.edu>.

- COOK ER, PETERS K (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45–53.
- ČUFAR K, DE LUIS M, ZUPANČIČ M, ECKSTEIN D (2008a) A 548-year tree-ring chronology of oak (*Quercus* spp.) for Southeast Slovenia and its significance as a dating tool and climate archive. *Tree-Ring Res* 64/1: 3–15. doi: 10.3959/2007-12.1
- ČUFAR K, DE LUIS M, ECKSTEIN D, KAJFEŽ-BOGATAJ L (2008b) Reconstructing dry and wet summers in SE Slovenia from oak tree-ring series. *Int J Biometeorol* 52: 607–615. doi: 10.1007/s00484-008-0153-8
- D'ARRIGO R, WILSON R, LIEPERT B, CHERUBINI P (2008) On the “Divergence Problem” in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global Planet Change* 60: 289–305. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.03.004
- D'ARRIGO R, WILSON R, JACOBY G (2006) On the long-term context for late twentieth century warming. *J Geophys Res* 111, D03103. doi:10.1029/2005JD006352.303R.
- DÁVID J (2008) Őrség erdőfejlesztési terve. MgSzH Központ Erdészeti Igazgatóság. Balatonfüred, 147 p.
- DE LUIS M, ČUFAR K, SAZ MA, LONGARES LA, CEGLAR A, KAJFEŽ-BOGATAJ L (2014) Trends in seasonal precipitation and temperature in Slovenia during 1951–2007. *Reg Environ Change* 14: 1801–1810. doi: 10.1007/s10113-012-0365-7
- DE LUIS M, NOVAK K, RAVENTÓS J, GRIČAR J, PRISLAN P, ČUFAR K (2011) Climate factors promoting intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) from semiarid sites. *Dendrochronologia* 29: 163–169. doi: 10.1016/j.dendro.2011.01.005
- DE MICCO V, BATTIPAGLIA G, CHERUBINI P, ARONNE G (2013) Comparing methods to analyse anatomical features of tree rings with and without intra-annual density fluctuations (IADFs). *Dendrochronologia* 32: 1–6. doi: 10.1016/j.dendro.2013.06.001
- DE MICCO V, CAMPELO F, DE LUIS M, BRÄUNING A, GRABNER M, BATTIPAGLIA G, CHERUBINI P (2016) Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why? *AIWA Journal* 37/2: 232–259. doi: 10.1163/22941932-20160132
- DEAN JS, SLAUGHTER MC, BOWDEN DOIII (1996) Desert dendrochronology: Tree-ring dating prehistoric sites in the Tucson Basin. *Kiva* 62: 7–26. doi: 10.1080/00231940.1996.11758322
- DEAN, JS (1978) Tree-Ring dating in Archeology. University of Utah Anthropological Papers, 24: 129–163.
- DELLA-MARTA PM, LUTERBACHER J, VON WEISSENFLUH H, XOPLAKI E, BRUNET M, WANNER H (2007) Summer heatwaves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-

- scale forcings and predictability. *Clim Dynam* 29: 251-275 doi:10.1007/s00382-007-0233-1
- DÖVÉNYI Z (Ed.) (2010) Magyarország kistájainak katasztere. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet. Budapest, 876 p.
- EUFORGEN (2009) Distribution Map of Scots Pine (*Pinus Sylvestris*). www.euforgen.org.
- FRANK DC, ESPER J (2004) Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia* 22: 107-121. doi: 10.1016/j.dendro.2005.02.004
- FRIEDRICH M, REMMELE S, KROMER B, HOFMANN J, SPURK M, KAUSER KF, ORCEL C, KUPPERS M (2004) The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe; a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46/3: 1111–1122. doi: 10.2458/azu_js_rc.46.4172
- FRITTS HC (1976) Tree rings and climate. The Blackburn Press, New Jersey, 567 p.
- FÜHRER E, EDELÉNYI M, HORVÁTH L, JAGODICS A, JEREB L, KERN Z, MÓRING A, SZABADOS I, PÖDÖR Z (2016) Effect of weather conditions on annual and intra-annual basal area increments of a beech stand in the Sopron Mountains in Hungary. *Időjárás* 120/2: 127-161.
- FÜHRER E, MAROSI GY, JAGODICS A, JUHÁSZ I (2011) A klímaváltozás egy lehetséges hatása az erdőgazdálkodásban. *Erdészeti közlemények* 1/1: 17-28.
- GARAMSZEGI B, KERN Z (2014) Climate influence on radial growth of *Fagus sylvatica* growing near the edge of its distribution in Bükk Mts., Hungary. *Dendrobiology* 72: 89–97. doi: 10.12657/denbio.072.008
- GENCSI L (1976) A csertölgy anatómiai jellemzőinek változása a bétől a kéregig haladó irányban. *EFE Tudományos közleményei*, 1976/1.
- GENCSI L (1980) Erdészeti növénytan I. Növénytársaság, növényélettan. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 367 p.
- GRISSINO-MAYER HD (2001) Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res* 57/2: 205-221.
- GRISSINO-MAYER HD (2003) A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-Ring Res* 59/2: 63–79.
- GRYNAEUS A (1997) Dendrokronológiai kutatások Magyarországon. Kandidátusi értekezés, Budapest, 138 p.
- GRYNAEUS A (2004) A magyarországi dendrokronológiai kutatás eredményei és új kérdései. In: ROMHÁNYI FB, GRYNAEUS A, MAGYAR K, VÉGH A (Eds.) *Monumenta Historica*

- Budapestensia XIII. „Es tu scholaris” Ünnepi tanulmányok Kubinyi András 75. születésnapjára, Budapesti Történeti Múzeum, 87–102 p.
- GRYNAEUS A (2006) Dendrokronológiai vizsgálat három dunántúli (kora)újkorai emléken. *Studia Caroliensia* 3-4: 383-388.
- GRYNAEUS A, SARKADI M (2007) A soproni Szentlélek-templom tetőszerkezete. *Művészettörténeti Értesítő* 56: 83-93. doi: 10.1556/MuvErt.56.2007.1.6
- GULYÁS K, BIDLÓ A, HORVÁTH A (2014) Causes of the Forest Die-off in a Pinus Forest (*Pinus sylvestris*) in Fenyőfő. In: POLGÁR A, BAZSÓ T, NAGY G, GÁLOS B (Eds.) Local and regional challenges of climate change adaptation and green technologies. Proceedings. Sopron, Hungary, 60-67 p.
- HANTEMIROV RM, GORLANOVA LA, SHIYATOV SG (2004) Extreme temperature events in summer in northwest Siberia since AD 742 inferred from tree rings. *Palaeogeogr Palaeoclimatol* 209: 155-164. doi: 10.1016/j.palaeo.2003.12.023
- HARRIS I, JONES PD (2015) CRU TS3.23: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.23 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901- Dec. 2014). Centre for Environmental Data Analysis, 09 November 2015. doi:10.5285/4c7fdfa6-f176-4c58-acee-683d5e9d2ed5.
- HOLMES RL (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69–78.
- HORVÁTH E (1981) Az évgyűrű kronológia készítés hidrometeorológiai vonatkozása. In: Magyar Hidrológiai Társaság II. Országos Vándorgyűlése Pécs, 1981. július 1–2. 129–134 p.
- HORVÁTH E (2004) Az évgyűrűs kormeghatározás hidrológiai vonatkozásai. *Hidrológiai Közlöny* 84/2: 37–57.
- ILON G, GRYNAEUS A, TORMA A (2001) A szentgotthárdi török kori palánk kutatásáról. *Vasi honismereti és helytörténeti közlemények* 2001/4: 29-46.
- JACOBY GC, D'ARRIGO R (1995) Tree-ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Glob Biogeochem Cycles* 9: 227-234. doi: 10.1029/95GB00321
- KATZ RW, GLANTZ MH (1986) Anatomy of a rainfall index. *Mon Weather Rev* 114: 764–771. doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<0764:AOARI>2.0.CO;2
- KERN Z, ÁRVAI M, GRYNAEUS A (2014) Dendrokronológiai vizsgálatok a szokolya- királyréti fa harangláb anyagán. *Archeometriai Műhely* 11/1: 71–76.
- KERN Z, FÓRIZS I, NAGY B, KÁZMÉR M, GÁL A, PALCSU L, SZÁNTÓ Zs (2004) Az elmúlt évezred klimatikus ingadozásainak részletes rekonstrukciója a Bihar-hegységi Eszkimó-barlang

- környezetében. In: BARTON G, DORMÁNY G (Eds.): A magyar földrajz kurrens eredményei: II. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged, 854–868 p.
- KERN Z, GRYNÆUS A, MORGÓS A (2009a) Reconstructed precipitation for southern Bakony Mountains (Transdanubia, Hungary) back to 1746 AD based on ring widths of oak trees. *Időjárás* 113: 299–314.
- KERN Z, NAGY B, POPA I (2009b) A periglaciális környezet változásainak vizsgálata a Kelemen–havasokban meteorológiai adatok elemzésével a geomorfológiai és dendrokronológia bizonyítékai tükrében. In: KÁZMÉR M (Ed.): Környezettörténet: Az utóbbi 500 év környezeti eseményei történeti és természettudományi források tükrében. Hantken Kiadó, Budapest, 315–336 p.
- KERN Z, NÉMETH A, HOROSZNÉ GULYÁS M, POPA I, LEVANIC T, HATVANI IG (2016) Natural proxy records of annual temperature- and hydroclimate variability from the Carpathian-Balkan Region for the past millennium: review & recalibration. *Quatern Int* 415: 109–125. doi: 10.1016/j.quaint.2016.01.012
- KERN Z, PATKÓ M, KÁZMÉR M, FEKETE J, KELE S, PÁLYI Z (2013) Multiple tree-ring proxies (earlywood width, latewood width and $\delta^{13}\text{C}$) from pedunculate oak (*Quercus robur* L.), Hungary. *Quatern Int* 239: 257–267. doi:10.1016/j.quaint.2012.05.037
- KERN Z, POPA I (2007) Climate-growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mts., Romania. *Dendrochronologia* 24/2-3: 109–115. doi: 10.1016/j.dendro.2006.10.006
- KERN Z, POPA I (2008) Changes of frost damage and treeline advance for Swiss stone pine in the Calimani Mts. (Eastern Carpathians, Romania). *Acta Silv Lign Hun* 4: 39–48.
- KERN Z, POPA I, VARGA Z, SZELES E (2009c) Degraded temperature sensitivity of a stone pine chronology explained by dendrochemical evidences. *Dendrochronologia* 27/2: 121–128. doi: 10.1016/j.dendro.2009.06.005
- KERTÉSZ R, MORGÓS A, NAGY D, SZÁNTÓ ZS (2005) Hódoltság kori cölöphidak a Tiszán. *Műemlékvédelem* XLIX/1: 13–28.
- KEVEY B (2008) Magyarország erdőtársulásai. *Tilia* 14: 1–488.
- KOPROWSKI M (2012) Long-term increase of March temperature has no negative impact on tree rings of European larch (*Larix decidua*) in lowland Poland. *Trees – Struct Funct* 26: 1895–1903. doi: 10.1007/s00468-012-0758-8
- KOPROWSKI M (2013) Spatial distribution of introduced Norway spruce growth in lowland Poland: The influence of changing climate and extreme weather events. *Quatern Int* 283: 139–146. doi: 10.1016/j.quaint.2012.04.020

- KOPROWSKI M, DUNCKER P (2012) Tree ring width and wood density as the indicators of climatic factors and insect outbreaks affecting spruce growth. *Ecol Indic* 23: 332–337. doi:10.1016/j.ecolind.2012.04.007
- KÓSA E (1963) Az erdeifenyő jelentősége és egészségi állapota a Bakonyszentlászló környéki erdőben. Diplomadolgozat. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron.
- KULIN GY (1941) A fák évgyűrűi és a napfoltperiódus. *Csillagászati lapok* 1941/4: 33–37.
- LADÁNYI ZS, BLANKA V (2015) Tree-ring width and its interrelation with environmental parameters: case study in Central Hungary. *Journal of Environmental Geography* 8/3–4: 53–59. doi: 10.1515/jengeo-2015-0012
- LEVANIČ T, POPA I, POLJANŠEK S, NECHITA C (2012) A 323-year long reconstruction of drought for SW Romania based on black pine (*Pinus Nigra*) tree-ring widths. *Int J Biometeorol* 57/5: 703–714. doi:10.1007/s00484-012-0596-9
- LEVANIČ T, POLJANŠEK S, TOROMANI E (2015) Early summer temperatures reconstructed from black pine (*Pinus nigra* Arnold) tree-ring widths from Albania. *Holocene* 25/3: 469–481. doi: 10.1177/0959683614561882
- LIANG E, ECKSTEIN D (2006) Light rings in Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) in semiarid areas of north China and their palaeoclimatological potential. *New Phytol* 171: 783–791. doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01775.x
- MAJER A (1972) Évgyűrű-kronológia. *Az Erdő* 21: 164–171.
- MAJER A (1988) Fenyves a Bakonyalján. Akadémiai Kiadó, Budapest, 375 p.
- MENZEL A, FABIAN P (1999) Growing season extended in Europe. *Nature* 397: 659. doi:10.1038/17709
- MÉRIAN P, PIERRAT J-C, LEBOURGEOIS F (2013) Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31: 58–67. doi:10.1016/j.dendro.2012.07.001
- MICHELOT A, BRÉDA N, DAMESIN C, DUFRENE E (2012) Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecol Manag* 265: 161–171. doi:10.1016/j.foreco.2011.10.024
- MILLS C (1988) Dendrochronology: the long and the short of it. In: SLATER EA, TATE OJ (Eds.): *Science and archeology*, Glasgow, British Archaeological Reports, 549–565 p.
- MISI D, NÁFRÁDI K (2016a) Possibility of identification of negative extreme climatic events using *Pinus sylvestris* tree-rings in Transdanubia, Hungary. *Dendrobiology* 75: 45–54. doi: 10.12657/denbio.075.005

- MISI D, NÁFRÁDI K (2016b) Late winter - early spring thermal conditions and their long-term effect on tree-ring growth in Transdanubia, Hungary. *Baltic For* 22/2: 203-211.
- MISI D, NÁFRÁDI K (2017) Growth response of Scots pine to changing climatic conditions of the last 100 years: a case study from Western Hungary. *Trees – Struct Funct* (in press) doi: 10.1007/s00468-016-1517-z
- MOLNÁR S, PESZLEN I, PAUKÓ A (2007) *Faanatómia*. Szaktudás kiadóház, Budapest, 223 p.
- MORGÓS A (2001) Régészeti vizes faanyagok jellemzői, száradás alatti károsodása, tárolása és konzerválása In: KOVÁCS T (Ed.): *Museologica Carpathica*, Miskolc, 221–225 p.
- MORGÓS A (2002a) Régészeti faanyagok konzerválása, in-situ szilárdítása Százhalombattán. *Műtárgyvédelem* 28: 31–47.
- MORGÓS A (2002b) A dendrokronológiáról. *Erdélyi Magyar Restaurátor Füzetek* 2: 13–25 p.
- MORGÓS A (2007) Régészeti faanyagok konzerválása. In: GÖMÖRI J (Ed.): *Az erdő és a fa régészete és néprajza*. MTA VEAB Soproni Tudós Társasága, Sopron, 317–417 p.
- MORGÓS A, HOLPORT Á, LUKÁCS K, GELESZ A, POROSZLAI I (2006) On-site conservation/reconstruction of an Iron Age tumulus with timber grave chamber, Százhalombatta, Hungary. *Conservation and Management of Archeological Sites* 7/3: 139–162. doi: 10.1179/135050306793137458
- NAGY L (2009) Éghajlati alkalmazkodóképesség és válaszreakció előrejelzése erdeifenyő (*Pinus sylvestris*) populációkon. PhD értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, 60 p.
- NASH, SE (2002) Archaeological Tree-Ring Dating at the Millennium. *J Archaeol Res* 10/3: 243–275. doi:10.1023/A:1016024027669
- OSBORN T, BRIFFA K, JONES PD (1997) Adjusting variance for sample-size in tree-ring chronologies and other regional-mean timeseries. *Dendrochronologia* 15: 89-99.
- PÁLFAI I (2011) Aszályos évek az alföldön 1931–2010 között. In: RAKONCZAI J (Ed.), *Környezeti változások és az Alföld*. Nagyalföld Alapítvány Kötetei 7., Békéscsaba, 87-97 p.
- PANAYOTOV M, ZAFIROV N, CHERUBINI P (2013) Fingerprints of extreme climate events in *Pinus sylvestris* tree rings from Bulgaria. *Trees – Struct Funct* 27: 211–227. doi: 10.1007/s00468-012-0789-1
- PAPP L (1966) Időjárási kártételek a fenyvesekben. In: BABOS I, DANSZKY I, GERGÁCS J, KISS L: *A fenyők termesztése*. Akadémiai Kiadó, 428-441 p.
- PAPP Z (1983) Investigations on the Climatic Effects of Great Vulcanic Eruptions by the Method of tree-ring Analysis. *Bull Vulcanol* 46/2: 89-102. doi:10.1007/BF02597579

- PAPP Z (1984) A vulkáni tevékenység klimatikus hatásainak vizsgálata Magyarországon az évgyűrű-analízis tükrében. Botanikai Közlemények 71/1-2: 109–121.
- PAPP Z (1986) A hőmérséklet, a csapadék és az évgyűrűszélességek időbeli változásának összehasonlítása a naptevékenység ciklusaival. Botanikai közlemények 73: 113-122.
- PÄRN H (2003) Radial growth response of Scots pine to climate under dust pollution in northeast Estonia. Water Air Soil Poll 144: 343–361. doi:10.1023/A:1022969301545
- PÄRN H (2009) Temporal history of relationships between Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth and mean monthly temperatures. Baltic For 15: 48–57.
- PÄRN H, MANDRE M (2011) Dendrochronological analysis of the growth and growth–climate relationships of conifers in the region of alkaline dust deposition. Forest Ecol Manag 262: 88–94. doi:10.1016/j.foreco.2010.06.019
- PROKOP O, KOLÁŘ T, BÜNTGEN U, KYNCL J, BOŠEL’A M, CHOMA M, BARTA P, RYBNÍČEK M (2016) On the palaeoclimatic potential of a millennium-long oak ring width chronology from Slovakia. Dendrochronologia 40: 93-101. doi: 10.1016/j.dendro.2016.08.001
- REICH PB, OLEKSYN J (2008) Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north. Ecol Lett 11: 588-597. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01172.x
- RINN F (2003) TSAP-Win Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. User Reference, Heidelberg, 110 p.
- ROBINSON WJ (1976) Tree-ring dating and archeology in the American southwest. Tree-Ring Bulletin 36: 9–20.
- SCHWEINGRUBER FH (1983) Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Haupt, Bern, 234 p.
- SCHWEINGRUBER FH (1996) Tree rings and environment. Dendroecology. Paul Haupt Verlag, Berne, 609 p.
- STOKES MA, SMILEY TL (1968) An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago Press, Chicago, 73 p.
- STRUMIA G (1999) Tree-ring based reconstruction of precipitation in Eastern Austria. PhD értekezés, Universität für Bodenkultur, 119 p.
- SÜMEGI P, ILON G, JAKAB G, PÁLL DG, TÖRÖCSIK T (2009) Neolit és rézkori régészeti kultúrák és környezeti hátterük az Alpokaljáról. In: BENDE L, LŐRINCZY G (Eds.): Medinától Etéig. Régészeti Tanulmányok Csalog József születésének 100. évfordulójára. Koszta József Múzeum Kiadványa, Szentes, 189-195 p.

- SÜMEGI P, NÁFRÁDI K, TÖRŐCSIK T (2011) Holocene vegetation History in the Alpine Foreland at Szombathely-Zanat, Western Hungary. In: BALÁZS P, KONKOLY-GYURÓ É (Eds.) Workshop on Landscape History. University of West Hungary, Sopron, 161-176 p.
- SZABADOS I (2006) The effect of the precipitation on the tree ring width. *Carpath J Earth Env* 1/2: 39-44.
- SZABADOS I (2007) Időjárási fluktuáció hatása a produkcióra dendrokronológiai kutatások alapján. In: MÁTYÁS CS, VIG P (Eds.): *Erdő és Klíma* 5, Sopron, 259-306 p.
- SZABÓ Z (1975) Dendrokronológia. Gépelt kézirat, 22 p.
- SZMORAD F, TÍMÁR G (1995) Növénytársulástani és – ökológiai tanulmányok. *Tilia* 1: 1-226.
- VAGANOV EA, HUGHES MK, SHASHKIN AV (2006) Growth Dynamics of Conifer Tree Rings. Images of the Past and Future Environments. Springer, 362 p.
- VITAS A, ERLICKYTÉ R (2008) Influence of Droughts To the Radial Growth of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.). *Ekológia (Bratislava)* 27: 367–378.
- WIGLEY TML, BRIFFA KR, JONES PD (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J Clim App Meteorol* 23: 201-213. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2
- WIGLEY TML, JONES PD, BRIFFA KR (1987) Cross-dating Methods in Dendrochronology. *J Archaeol Sci* 14: 51–64. doi: 10.1016/S0305-4403(87)80005-5
- XENAKIS G, RAY D, MENCUCCINI M (2012) Effects of climate and site characteristics on Scots pine growth. *Eur J For Res* 131: 427–439. doi: 10.1007/s10342-011-0516-2

Internetes hivatkozások:

- [1] Országos Faállományterület Fafaj szerint. NÉBIH Erdőleltár.
<http://portal.nebih.gov.hu/documents/531011/531862/1001101001000.pdf/a46edca0-2a66-45ce-b2b0-b5536ca790c1>
- [2] Distribution map of Scots pine (*Pinus sylvestris*) EUFORGEN 2009.
http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/PDF/Pinus_sylvestris.pdf

11. ÁBRAJEGYZÉK

- 1. ábra.** Magyarországi erdeifenyő állományok a NÉBIH Erdőleltárának adatai alapján.
(Forrás: NÉBIH Erdészeti Igazgatóság, Erdőleltár,
<http://portal.nebih.gov.hu/web/erdoleltar>) 8
- 2. ábra.** Egy tűlevelű keresztmetszeti képe. (Fritts 1976 nyomán, módosítva) 13
- 3. ábra.** Éven belüli sejtsűrűség ingadozás. A) Normál évgyűrű, B) L-gyűrű, C) E-gyűrű. (Saját felvétel) 17
- 4. ábra.** A keresztmetszés sematikus ábrája. (Schweingruber 1983 nyomán, módosítva) 24
- 5. ábra.** Két eltérő standardizációs eljárással becsült öregedési trend. 29
- 6. ábra.** Fenyőfő elhelyezkedése Győr-Moson-Sopron megyében (A) és a terület klímadiagrammja (B). 31
- 7. ábra.** Szalafő elhelyezkedése Vas-megyében (A) és a terület klímadiagrammja (B). 33
- 8. ábra.** Kővágószőlős elhelyezkedése Baranya-megyében (A) és a terület klímadiagrammja (B). 34
- 9. ábra.** Vámspércs elhelyezkedése Hajdú-Bihar-megyében (A) és a terület klímadiagrammja (B). 35
- 10. ábra.** Az Erdőleltárból származó furatok mintavételi pontjai. 36
- 11. ábra.** Magyarország hőmérséklet- és csapadékviszonyainak alakulása az elmúlt 100 évben.
A térképek a jelzett 25 éves periódusok átlagértékeit jelölik. 42
- 12. ábra.** Szezonális csapadék és hőmérsékletrendek országos átlaga az elmúlt 100 évben. 43
- 13. ábra.** Hőmérséklet anomáliák 25 éves átlagai a négy mintaterületen. Referencia időszak: 1971-2000. 44
- 14. ábra.** Csapadék anomáliák 25 éves átlagai a négy mintaterületen. Referencia időszak: 1971-2000. 46
- 15. ábra.** A Bakonyalja (zöld), az Őrség (narancs), a Mecsek (sárga) és a Nyírség (kék) területi kronológiáinak nyers RW (A), EW (B) és LW (C) görbéi. 51
- 16. ábra.** A négy mintaterület EPS és Rbar értékeinek időbeli lefutása. A szürke vízszintes vonal az EPS-hez tartozó 0,85-ös szignifikancia szintet jelöli. 53
- 17. ábra.** Az éghajlati paraméterek és a korai pászták szélességeinek korrelációs kapcsolata. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$). 54
- 18. ábra.** Az éghajlati paraméterek és a kései pászták szélességeinek korrelációs kapcsolata. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$). 55

19. ábra. Az éghajlati paraméterek és a teljes évgyűrűk szélességeinek korrelációs kapcsolata. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$).	56
20. ábra. A Bakonyalja hőmérsékleti viszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	58
21. ábra. A Bakonyalja csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	60
22. ábra. Az Őrség hőmérsékleti viszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	62
23. ábra. Az Őrség csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	64
24. ábra. A Mecsek hőmérsékleti viszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	67
25. ábra. A Mecsek csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	69
26. ábra. A Nyírség hőmérsékleti viszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	71
27. ábra. A Nyírség csapadékviszonyainak és évgyűrűkronológiáinak csúszókorrelációs kapcsolata. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	72
28. ábra. Jellemző vékony évgyűrű képződési ciklus az 1960-as években a Bakonyalján. (saját felvétel)	74
29. ábra. A négy mintaterületen regisztrált vékony évgyűrűk gyakorisági eloszlása.	75
30. ábra. A négy mintaterületen regisztrált éven belüli sejtsűrűség ingadozások gyakorisági eloszlása.	77
31. ábra. A márciusi hőmérséklet és az évgyűrűkronológiák kapcsolatának időbeli változása a Bakonyalján. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik. .	81
32. ábra. A márciusi hőmérséklet és az évgyűrűkronológiák kapcsolatának időbeli változása az Őrségben. A vízszintes szaggatott vonalak a 95%-os szignifikancia szintet jelölik.	82
33. ábra. A júliusi hőmérséklet és az évgyűrűkronológiák kapcsolata a négy mintaterületen.	84
34. ábra. A júliusi csapadék és az évgyűrűkronológiák kapcsolata a négy mintaterületen.	86
35. ábra. A vékony évgyűrűk gyakorisági értékeinek kapcsolata az ariditási indexekkel a négy mintaterületen.	89

36. ábra. A Bakonyalja (zöld), az Őrség (narancs), a Mecsek (sárga) és a Nyírség (kék) területi kronológiáinak standardizált RW (A), EW (B) és LW (C) indexgörbéi.....	91
37. ábra. A négy mintaterület teljes évgyűrűsége kronológiáinak térbeli kapcsolata a nyári (JJA) csapadékkal.....	93
38. ábra. A Bakonyaljáról származó RW kronológia térbeli kiterjeszthetőségének változása nyári (JJA) csapadék alapján az elmúlt 100 év során.	94
39. ábra. Kiugró értékek nélküli évgyűrűnövekedési anomáliák két aszályos évben az Erdőleltárból származó furatok szélességadatai alapján.	95

12. TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat. A területi kronológiák fontosabb statisztikai adatai.	50
2. táblázat. Az egyes kronológiák átlagos EPS és Rbar értékei.	53
3. táblázat. A területi kronológiák korrelációs mátrixa.....	92

13. MELLÉKLETEK JEGYZÉKE

1. **melléklet.** A bakonyaljai és az őrségi minták IADF adatainak kapcsolata az egyes időszakok hőmérséklet-, csapadék- és szárazsági viszonyaival. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$). 117
2. **melléklet.** A bakonyaljai és az őrségi minták vékony évgűrű adatainak kapcsolata az egyes időszakok hőmérséklet-, csapadék- és szárazsági viszonyaival. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$). 118
3. **melléklet.** A mecseki és a nyírségi minták vékony évgűrű adatainak kapcsolata az egyes időszakok hőmérséklet-, csapadék- és szárazsági viszonyaival. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$). 119
4. **melléklet.** A négy mintaterület korai pászta kronológiáinak térbeli kapcsolata a február-márciusi hőmérséklettel. 120
5. **melléklet.** A négy mintaterület teljes évgűrűszélesség kronológiáinak térbeli kapcsolata a február-márciusi hőmérséklettel. 121
6. **melléklet.** A négy mintaterület kései pászta kronológiáinak térbeli kapcsolata a nyári (JJA) csapadékkal. 122
7. **melléklet.** A kiugró értékeket is tartalmazó évgűrűnövekedési anomáliák két aszályos évben az Erdőleltárból származó furatok szélességadatai alapján. 123

MELLÉKLETEK

1. melléklet. A bakonyaljai és az Őrségi minták IADF adatainak kapcsolata az egyes időszakok hőmérséklet-, csapadék- és szárazsági viszonyaival. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$).

2. melléklet. A bakonyaljai és az őrségi minták vékony évgűrű adatainak kapcsolata az egyes időszakok hőmérséklet-, csapadék- és szárazsági viszonyaival. A teli oszlopok a szignifikáns értékeket jelölik ($p < 0,05$).

4. melléklet. A négy mintaterület korai pászta kronológiáinak térbeli kapcsolata a február-márciusi hőmérséklettel.

5. melléklet. A négy mintaterület teljes évgyűrűségeesség kronológiáinak térbeli kapcsolata a február-márciusi hőmérséklettel.

6. melléklet. A négy mintaterület kései pászta kronológiáinak térbeli kapcsolata a nyári (JJA) csapadékkal.

7. melléklet. A kiugró értékeket is tartalmazó évgűrűnövekedési anomáliák két aszályos évben az Erdőleltárból származó furatok szélességadatai alapján.